ISSN (Print) 2708 - 4132
ISSN (Online) 2663 - 1830

№ 1 (30) - 2026

Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті

Kazakh University of Technology and Business named after K.Kulazhanov

Казахский университет технологии и бизнеса имени К.Кулажанова

ҚазТБУ ХАБАРШЫСЫ

VESTNIK KazUTB

ВЕСТНИК КазУТБ

Жылына 4 рет шығады
Published 4 times a year
Выходит 4 раза в год

Астана - 2026
Astana - 2026

Бас редактор: Байболова Л.К.

техн. ғыл. докторы, профессор, ректоры

Бас редактордың орынбасары: Айбульдинов Е.К.

философия докторы (PhD), (Қазақстан)

Редакция алқасы:

Құлажанов Қ.С. х.ғ.д., профессор, ҚР ҰҒА академигі (Қазақстан)

Мансуров З.А. х.ғ.д., профессор, ҚР ҰҒА академигі (Қазақстан)

Фазылов С.Д. х.ғ.д., профессор, ҚР ҰҒА академигі (Қазақстан)

Құлажанов Т.К. т.ғ.д., профессор, ҚР ҰҒА академигі (Қазақстан)

Ізтаев А.И. т.ғ.д., профессор,ҚР ҰҒА академигі (Қазақстан)

Төлтабаев М.Ч. т.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Нұрахметов Б.К. т.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Шеров Т.К. т.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Mercade P.R. философия докторы (PhD) (Испания)

Кәкімов А.К. т.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Узаков Я.М. т.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Додаев К.О. т.ғ.д., профессор (Өзбекстан)

Кузнецов О.Л. т.ғ.д., профессор (Ресей)

Мымрин В.А. т.ғ.д., профессор (Бразилия)

Маткаримов Б.Т. т.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Мұхамедиев Б.М. э.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Смағұлова Ш.А. э.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Пешков В. философия докторы (PhD), (Бельгия)

Искакова Ж.Б. х.ғ.к., профессор м.а. (Қазақстан)

Жауапты редактор, ф. - м. ғ. к. - М.К.Оспанова

Меншіктенуші: «Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ

ҚР Ақпарат және коммуникациялар министрлігінде 07. 02.2014 ж. № 14139-Ж тіркеу куәлігімен тіркелген.

Екінші тіркеу:11.02.2020 - № KZ46VPY00020253.

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

ISSN: 2708-4132, **ISSN (Online):** 2663-1830

Тақырыптық бағыт: Ақпараттық-коммуникациялық және химиялық технология, Өңдеу және өңдеуші өнеркәсіптер (азық-түлік өнімдерінің технологиясы, тау-кен, мұнай-газ ісі), Экономика, бизнес және қызмет көрсету.

Редакцияның мекенжайы: 010000, Қазақстан, Астана қ., Қайым Мұхамедханов к-сі, 37 «А», тел.: +7(7172)72-58-12 (134), e-mail: vestnik@kaztbu.edu.kz

© Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті

Главный редактор: Байболова Л.К.

д.т.н., профессор, Ректор

Заместитель главного редактора: Айбульдинов Е.К.

доктор философии (PhD), (Казахстан)

Редакционная коллегия:

Кулажанов К.С. д.х.н., профессор, академик НАН РК (Казахстан)

Мансуров З.А.. д.х.н., профессор, академик НАН РК (Казахстан)

Фазылов С.Д. д.х.н., профессор, академик НАН РК (Казахстан)

Кулажанов Т.К. д.т.н., профессор, академик НАН РК (Казахстан)

Изтаев А.И. д.т.н., профессор, академик НАН РК (Казахстан)

Тултабаев М.Ч.. д.т.н., профессор (Казахстан)

Нурахметов Б.К. д.т.н., профессор (Казахстан)

Шеров Т.К. д.т.н., профессор (Казахстан)

Mercade P.R. доктор философии (PhD) (Испания)

Какимов А.К. д.т.н., профессор (Казахстан)

Узаков Я.М. д.т.н., профессор (Казахстан)

Додаев К.О. д.т.н., профессор (Узбекистан)

Кузнецов О.Л. д.т.н., профессор (Россия)

Мымрин В.А. д.т.н., профессор (Бразилия)

Маткаримов Б.Т. д.т.н., профессор (Казахстан)

Мухамедиев Б.М. д.э.н., профессор (Казахстан)

Смагулова Ш.А. д.э.н., профессор (Казахстан)

Пешков В. доктор философии (PhD), (Бельгия)

Искакова Ж.Б . к.х.н., асс. профессор (Казахстан)

Ответственный редактор, к.ф.-м.н. - М.К.Оспанова

Собственник: АО «Казахский университет технологии и бизнеса».

Регистрация: Министерство информации и коммуникаций Республики Казахстан. Комитет Информации.

Дата и номер первичной постановки на учет: № 14139-Ж от 07.02.2014.

Вторичная постановка на учет: 11.02.2020 - № KZ46VPY00020253.

Периодичность: Ежеквартально.

ISSN: 2708- 4132, **ISSN (Online):** 2663-1830.

Тематическая направленность: Информационно-коммуникационные и химические технологии, Производственные и обрабатывающие отрасли (технология продовольственных продуктов, горное дело, нефтегазовое дело, Экономика, бизнес и услуги).

Адрес редакции: 010000, г. Астана, Есильский район, ул.Кайыма Мухамедханова, 37 «А» тел.: +7(7172)72-58-12 (134), e-mail: vestnik@kaztbu.edu.kz

© Казахский университет технологии и бизнеса К.Кулажанова

Chief editor: Baybolova L.K.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector

Deputy editor: Aibuldinov Ye.K.

Doctor of Philosophy (PhD), (Kazakhstan)

Editorial board:

Kulazhanov K. S. Doctor of Chemistry Sciences, Academician NAS RK (Kazakhstan)

Mansurov Z. A. Doctor of Chemistry Sciences, Academician NAS RK (Kazakhstan)

Fazylov S.D. Doctor of Chemistry Sciences, Academician NAS RK (Kazakhstan)

Kulazhanov T.K. Doctor of Technical Sciences, Academician NAS RK (Kazakhstan)

Iztayev A.I. Doctor of Technical Sciences, Academician NAS RK (Kazakhstan)

Tultabaev M.Ch. Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazakhstan)

Nurakhmetov B.K. Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazakhstan)

Sherov T.K. Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazakhstan)

Mercade P.R. Doctor of Philosophy (PhD) (Spain)

Kakimov A.K. Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazakhstan)

Uzakov Ya.M. Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazakhstan)

Dodayev K.O. Doctor of Technical Sciences, Professor (Uzbekistan)

Kuznetsov O.L. Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Mymrin V. A. Doctor of Technical Sciences, Professor (Brazil)

Matkarimov B.T. Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazakhstan)

Mukhamediyev B. Doctor of Economics, Professor (Kazakhstan)

Smagulova A.S. Doctor of Economics, Professor (Kazakhstan)

Peshkov V. Doctor of Philosophy (PhD) (Belgium)

Iskakova J.B. Candidate of Chemical Sciences, ass.Professor (Kazakhstan)

Responsible editor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences - M.K.Ospanova

Owner: JSC «Kazakh University of technology and business».

Registration: Ministry of information and communications of the Republic of Kazakhstan. Committee of Information.

Date and number of initial registration: 14139-Z from 07.02.2014.

Secondary registration: 11.02.2020- № KZ46VPY00020253.

Frequency: Quarterly.

ISSN: 2708- 4132, **ISSN (Online):** 2663-1830.

Thematic direction: Information and communication and chemical technologies, Manufacturing and manufacturing industries (food technology, mining, oil and gas business), Economy, business and services.

Address of edition: 010000, Astana city, Esil district, Kaiym Mukhamedkhanov Street, 37 «A», tel.: +7(7172)72-58-12 (134), e-mail: vestnik@kaztbu.edu.kz

©Kazakh University of technology and business named after K.Kulazhanov

МАЗМҰНЫ – СОДЕРЖАНИЕ – CONTENTS

Информационно-коммуникационные и химические технологии

1 Информационно-коммуникационные технологии **1**

З.А. Сарсембаева, Г.И. Аймичева, А.Е. Назырова
ЖЕЛІ АРҚЫЛЫ ЖАЛҒАН КОНТЕНТТІ ТАСЫМАЛДАУДЫ ІЗДЕУ ҮШІН ЖЕЛІЛІК ТРАФИКТІ ТАЛДАУ 1

A.T. Mazakova, Sh.A. Jomartova, T.Zh. Mazakov, B. Zhao, A.M. Abubakirov
ARCHITECTURE AND APPLICATION OF A BIOTECHNICAL SYSTEM FOR HUMAN PSYCHOPHYSIOLOGICAL TESTING 13

К. Акишев, Л. Акишева, Ж. Нуртай
ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРДЫҢ ГРАНУЛОМЕТРИЯСЫН АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ТАЛДАУ 23

Б. Рысбекқызы
МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ ИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИИ В СРЕДЕ PYTHON 46

L. Akisheva, A. Utegenov, A. Kyzken
PREDICTIVE MODEL OF LABORATORY CONTROL OF CHEMICAL COMPOSITION OF MINING AND METALLURGICAL PRODUCTS 59

Л.К. Демеубаева, Т.Ж. Мазаков, Ш.А. Джомартова, А.Т. Мазакова, А.Д. Майлыбаева, М.С. Алиаскар, Б. Чжао, А.Т. Досаналиева
ЭВАКУАЦИЯ НАСЕЛЕНИЯ ИЗ ГОРОДА В СЛУЧАЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ 74

Р.К. Ускенбаева, Абдул Разак, А.Б. Касымова, Ж.Б. Кальпеева, А.М. Анартаева
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ГРУППОВЫХ ПОКУПОК В КОНТЕКСТЕ ЭКОНОМИКИ СОВМЕСТНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ: АРХИТЕКТУРА, БИЗНЕС-МОДЕЛЬ И МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ 83

M.A. Bisenbi, O.G. Abdiramanov, M.B. Rakhimzhanova, G.B. Balgozhina, G.S. Shuteyeva, D.C. Zhamangarin
ADAPTIVE NONLINEAR CONTROL OF SPACECRAFT ATTITUDE USING NEURAL NETWORKS 94

Б.Ж. Жарлықасов, Г.М. Баенова, Қ.С. Мауленов, А.М. Сыздыков
RUBERT-ДИАГНОСТИКАСЫ ЖӘНЕ IRT-АДАПТИВТІ ТЕСТІЛЕУ НЕГІЗІНДЕ SQL ЖЕКЕЛЕНДІРІЛГЕН ОҚЫТУ 105

A. Tulegulov, A. Jumagaliyeva, A. Sadu, B. Yemilov, M. Nurmagambetov, J. Zhantlesov, I. Dyussebayev
SOFTWARE FOR SELECTIVE LASER MELTING METHOD FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES 118

B.B. Orazbayev, N.N. Seit
DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF THE MAIN UNITS OF THE SULFUR PRODUCTION UNIT BASED ON SYSTEM ANALYSIS 128

T.K. Azbergen, A.O. Tleubayeva, A. Aituarov, Y.T. Sabyrzhan
BENCHMARKING CALIBRATED GRADIENT BOOSTING WITH BEHAVIOURAL FEATURES FOR TRANSACTION-LEVEL AML DETECTION 139

М.Ж. Ергеш, Б.Ж. Ергеш, К.М. Максутова, А.Д. Тулегулов
ОНТОЛОГИЯЛЫҚ ТЕЗАУРУСТЫ ҚОЛДАНУ ӘДІСТЕМЕСІ СҰРАҚ-ЖАУАП ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ МОДУЛЬ ҚҰРУ 153

Д.Д. Орынбай, М.Ж. Калдарова, А.А. Абдилдаева, С.Б. Кашкинбаев
ПРОЕКТИРОВАНИЕ КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ С СИСТЕМОЙ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА . . . 171

Б.Б. Оразбаев, Ж.А. Кужуханова, Г.А. Ускенбаева, Б.А. Серимбетов, Л.Т. Курмангазиев
РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ В АТМОСФЕРНОМ БЛОКЕ ПРИ ДЕФИЦИТЕ И НЕЧЕТКОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ . . 188

Г.А. Амирханова, Е. Фарузқызы, Б.С. Амирханов, А.А. Раева, Д.С. Жайсанова
ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗ АРХИТЕКТУРАСЫНДАҒЫ ДЕРЕКТЕР АҒЫНЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ: IIOT ХАТТАМАЛАРЫНЫҢ ӨНІМДІЛІГІ МЕН ҚАУІПСІЗДІГІН КЕШЕНДІ ТАЛДАУ 201

N. Algashbekova, Dababrata Chowdhury, A. Katbayev
COMPUTATIONAL MODELING OF PUBLIC PERCEPTION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON REDDIT USING ML 215

R. Mukasheva, Sh.T. Tezekpayeva, B. Karimkyzy, Ye.A. Malgazharov, S.N. Kubentayeva
ENSEMBLING NEURAL NETWORK ARCHITECTURES FOR DIABETES PREDICTION . . . 226

Е.Ш. Утюбаев, А.В. Шапорева, О.В. Григоренко, Р.А. Ельтинова, А.К. Джакипбаев
РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ МОНИТОРИНГА В СТРУКТУРЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РЕГИОНА 237

2 Химическая технология **249**

Е. Аубакиров, Ж. Ташмухамбетова, Ф. Ахметова, С. Сатаева, А. Кенесова, А. Темирова
ПОЛИМЕР ҚАЛДЫҚТАРЫН ТЕРМОКАТАЛИТИКАЛЫҚ ӨҢДЕУ ПРОЦЕСІ ҮШІН ТАБИҒИ ЦЕОЛИТ НЕГІЗІНДЕГІ КАТАЛИЗАТОРЛАРДЫҢ БЕЛСЕНДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ 249

К. Акишев, А. Подвалов, А. Зейнуллин, Е. Айбульдинов, А. Нурмаганбетов, М. Чагай, М. Оспанова, М. Айтиева, Л. Мылтыкбаева
АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РУДЕ В УСЛОВИЯХ ФАБРИКИ 257

С. Сатаева, В. Бурахта, Н. Джарасова, Т. Өтепова, А. Пшенбаев
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАТОМИТА ЗАПАДНОГО КАЗАХСТАНА В ПРОИЗВОДСТВЕ БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА 274

Р.О. Орынбасар, А.Е. Амангалиева, Л.К. Тастанова, Г.Ж. Жакупова, А.К. Жумабекова
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ 282

N.V. Seraya, V.V. Litvinov, G.K. Daumova, D.E. Sovetkhanov, M. Rutkowska-Gorczyca, M.M. Baimurzina
PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF GEOCOMPOSITE BASED ON LOW-PRESSURE POLYETHYLENE AND GEOTEXTILE DURING LONG-TERM OPERATION 297

А.Ж. Мендибаева, С.Д. Фазылов, С.К. Кабиева, Р.К. Жаслан, С.Б. Жаутикова, А.П. Богоявленский, О.А. Нуркенов
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРАСТВОРИМОЙ ФОРМЫ 2-((2-ИЗОНИКОТИНОИЛГИДРАЗОНО)МЕТИЛ)БЕНЗОЙНОЙ КИСЛОТЫ В β-ОЛИГОСАХАРИДНОЙ КАПСУЛЕ 309

О.В. Рожкова, О.О. Ковалева, Ж.А. Сеитова, В.И. Рожков, В.И Лебедева
ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ИНГИБИРУЮЩИХ СВОБОДНО ДИСПЕРСНЫХ ГИДРОГЕЛЕВЫХ ПРОМЫВОЧНЫХ СИСТЕМ КОАГУЛЯЦИОННОГО ТИПА 319

Производственные и обрабатывающие отрасли

3 Пищевая технология **332**

T.Ch. Tultabaeva, G.N. Zhakupova, K.K. Makangali, A.T. Sagandyk, A.K. Muldasheva, K.Sh. Dairova
A RESEARCH OF THE COMPOSITION AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF BUTTERMILK CONCENTRATE OBTAINED THROUGH ULTRAFILTRATION 332

А.Ж. Оразов, Б.Ж. Рыскалиева, А.А. Сармалаев, А.М. Меркенова
КF ҰЙЫТҚЫ ДАҚЫЛЫМЕН ӘРТҮРЛІ СҮТ ТҮРЛЕРІНІҢ АШУ ПРОЦЕСІН ЗЕРТТЕУ . . 346

Sh.B. Baytukenova, A. Kostanova, S.B. Baytukenova
MICROBIOLOGICAL SAFETY OF HORSEMEAT INTESTINAL BY-PRODUCTS: EFFECT OF ULTRASOUND AND CITRIC ACID TREATMENTS 358

А.Ә. Тоқтабек, Л.А. Мамаева, Hülya Gül, А.Е. Отуншиева, М.Д. Алибекова
ЙОГУРТ, БАЛДЫРКӨК ҰНТАҚТАРЫМЕН НЫҒАЙТЫЛҒАН МАКАРОН ӘЗІРЛЕУ БОЙЫНША ЗЕРТТЕУЛЕР 373

Ш.Ж. Жасқайрат, Н.С. Машанова, Д.С. Жаксыгалиева, М.Е. Бекболатова
ЛАКТОЗАСЫ ТӨМЕН ФУНКЦИОНАЛДЫҚ СҮТТІ СУСЫННЫҢ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ 384

А.К. Базанова, А.К. Какимов, Н.К. Ибрагимов, М.М. Ташыбаева
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ СТЕНДА ДЛЯ АДСОРБЦИОННО-ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ОТ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ СОРБЕНТОВ 394

Ш.Б. Байтукенова, М. Бақытбек, С.Б. Байтукенова, А.Т. Костанова
ПІСІРІЛГЕН ШҰЖЫҚ ӨНДІРІСІНДЕ АҚУЫЗ-МАЙ ЭМУЛЬСИЯСЫНЫҢ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖАСАУ 402

С.А. Карденов, А.К. Игенбаев, Ш.Б. Байтукенова, С.Б. Байтукенова, Ж.С. Ажгереева
ГУМИНДІ ЗАТТАРДЫҢ СҮТҚЫШҚЫЛДЫ ӨНІМДЕРДІҢ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІНЕ ЫҚПАЛЫ 413

A.E. Abdurasulova, B.A. Rskeldiev
SHEEP MEAT AND PLANT ANTIOXIDANTS IN THE TECHNOLOGY OF HIGH NUTRITIONAL-VALUE MEAT ROULADE: A SYSTEMATIC REVIEW 425

Д.Н. Бакытжан, Э.Б. Аскарбеков, И.В. Новикова, А.К. Кекибаева, Г.И. Байгазиева
ОТАНДЫҚ СЕЛЕКЦИЯЛЫ БИДАЙ ДӘНІНЕН СЫРАЛЫҚ УЫТ ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН УЫТ ӨСІРУ РЕЖИМДЕРІН ТАҢДАУ 438

Г.Е. Жумалиева, У.Ч. Чоманов, А.Б. Байзақова, А.К. Шоман
БАҚША ЖӘНЕ КӨКӨНІС ДАҚЫЛДАРЫН КЕПТІРУДІҢ ОҢТАЙЛЫ РЕЖИМДЕРІН ЖӘНЕ АЛЫНҒАН ҰНТАҚТАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ 450

М.Ч. Тултабаев, Н. Акжанов, А. Сәдуакас, А.С. Камали
МАҚСАРЫ МАЙЫ НЕГІЗІНДЕ ОРТАША ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ КАЛОРИЯЛЫ МАЙОНЕЗДІҢ РЕЦЕПТУРАСЫН ӘЗІРЛЕУ 463

B. Kalemshariv, R. Askar, A.K. Mustafayeva, M.T. Mursalykova, A.M. Shulenova
TECHNOLOGY FOR PRODUCING KURT FROM CAMEL MILK 473

М.Ж Султанова, У.З Сагындыков, А.С. Сәдуақас, М.А. Якияева, А.С Камали, Н. Акжанов
СОКСЛЕТ ӘДІСІ АРҚЫЛЫ ЮГЛОН АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖАСАУ ЖӘНЕ ӨНІМНІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ 482

А.М. Омаралиева, Ж.Т. Ботбаева, А.Ж. Хастаева, А.А. Бектурганова, М.Т. Агедилова, А.М. Рахимжанова, А.К. Аубакирова
ҰННАН ЖАСАЛҒАН КОНДИТЕРЛІК ӨНІМДЕРГЕ ҚОЛДАНАТЫН ЖИДЕК ДАҚЫЛДАРЫНАН АЛЫНҒАН ҰНТАҚТАРДЫҢ ФИЗИКА ХИМИЯЛЫҚ ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ 493
М.Е. Сейсеналы, М.П. Байысбаева, Д.А. Шаншарова
ПОЛБА ҰНЫНЫҢ ФИЗИКО-ХИМИЯЛЫҚ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН ЗЕРТТЕУ . . . 505
Д.Б. Курмангалиева, А.А. Дарибаева, Г.Т. Юсупова, Ж.К. Шадьярова, Г.Г. Жуматова
БАЛЫҚ ӨНІМДЕРІНІҢ САПАСЫ МЕН ҚАУІПСІЗДІГІН НОРМАТИВТІК РЕТТЕУ ЖӘНЕ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ СТАНДАРТТАРМЕН ҮЙЛЕСТІРУ 516
Л.Б. Умиралиева, М.А. Дибирасулаев, Д.М. Дибирасулаев, Л.Г. Стоянова, С.С. Турлыбаева, И.Д. Филатов
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИЩЕВОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОТЕРИ МАССЫ И ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТУШЕК ПТИЦЫ В ПРОЦЕССЕ ОХЛАЖДЕНИЯ И ХРАНЕНИЯ ПРИ БЛИЗКРИОСКОПИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ 527

4 Горное и нефтегазовое дело **542**
К. Акишев, А. Подвалов, А. Зейнуллин, Е. Айбульдинов, А. Нурмаганбетов, М. Оспанова, М. Чагай, М. Айтиева, С. Хусаинова, Л. Мылтыкбаева
СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ НЕДРОБИМЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЯХ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ 542
Л.М. Актаева, А.Б. Бекмагамбетов, А.М. Рахметова, Г.А. Насырова, Э.А. Құлмағамбетова, Г.К. Алшынбекова, А.Т. Шілменова, Н.Т. Сағындықова
ӨНДІРІСТІК ЖАРАҚАТТАНУ ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ФОСФОР ӨНЕРКӘСІБІ КӘСІПОРЫНДАРЫНДАҒЫ ЕҢБЕКТІ ҚОРҒАУ ЖӘНЕ КӘСІПТІК ТӘУЕКЕЛДЕРДІ БАСҚАРУ ЖАЙ КҮЙІНІҢ КӨРСЕТКІШІ РЕТІНДЕ 558
М.Д. Бисенгалиев, Р.Т. Сулейменова, Мухаммад Насир, Г.Ш. Досказиева, Ж.К. Зайдемова, О.Ш. Тулегенова, Ж.Б. Шаяхметова, А.С. Каримов
ҚАБАТТЫ ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ЖАРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ ЖӘНЕ ОНЫ ТҮРЛЕНДІРУ 574
Д.К. Бекбергенов, И.Н. Савич, А.А. Зейнуллин, Ж. Бимурат, Р.К. Жанакова
ОПТИМИЗАЦИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОБЫЧИ РУД В ЗОНАХ ОБРУШЕНИЯ ЖЕЗКАЗГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭММ 590
А.А. Орынбай, Т.С. Ибырханов, Е.О. Исабаев, А.И. Ибырханова
ТАУ-КЕН ЖҰМЫСТАРЫНДАҒЫ ҚАЗУ ЖӘНЕ ТИЕУ ҮРДІСТЕРІНДЕ ЦИФРЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ ҚОЛДАНУ 603
L. Akisheva, N. Bayzhomartov
DEVELOPMENT OF A PLATFORM FOR DATA INTEGRATION AND FORECASTING IN THE MINING INDUSTRY 616
А.Б. Жиенбаев, М.А. Жараспаев, М.Ж. Балпанова, А.Т. Карабатырова
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ЗАПАДНОЙ РУДНОЙ ЗОНЫ РУДНИКА АБЫЗ В ЭТАЖЕ 320÷190 М 634
S.N. Shaposhnik, D.A. Shokarev, N.V. Matvienko, K.T. Zikirova, Zh.T. Dauletzhanova, A.I. Konurin
INTEGRATED GEOMECHANICAL APPROACH TO ENSURING THE SAFETY OF UNDERGROUND MINING OF ORE DEPOSITS 648

5 Экономика, бизнес и услуги **662**

Г.М. Аубакирова, Ф.М. Исатаева, С.К. Мажитова, Л.И. Тогайбаева, С.М. Оспанова, А.Т. Дюсекеева

ЦЕНТРАЛЬНАЯ АЗИЯ В ГЛОБАЛЬНОЙ КОНКУРЕНЦИИ ЗА РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛЫ: РИСКИ ЦЕПОЧЕК ПОСТАВОК И ПУТИ УКРЕПЛЕНИЯ ПОЗИЦИЙ 662

M. Yerbatyrov, M. Zhetpisbayeva, Zh. Vladimirov, G. Baidauletova

EXPLAINING THE GAP BETWEEN INTEREST AND APPLICATION INTENTION IN PUBLIC SECTOR EMPLOYMENT 677

А.М. Шильманова, Г.А. Ибраева, А.С. Шайнуров, Г.К. Иляшова, С.А. Юсупова, С.Ғ. Тұңғышбай

СИСТЕМНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ 688

G.P. Koptayeva, A.B. Mukhamedkhanova, A.N. Issakhmetova, G.A. Myrzalieva, A.A. Mutaliyeva, D.N. Kelesbayev

THE NATURAL RESOURCE CURSE IN KAZAKHSTAN: ECONOMIC AND STRUCTURAL PROBLEMS AND SOLUTION PROPOSALS 703

G.A. Maulenberdieva, A.U. Abishova, D.B. Balabekova, G.A. Zhadigerova, A.Zh. Tuleeva

TAX REGULATION OF THE HOUSEHOLD SECTOR IN KAZAKHSTAN: AN ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE RESOURCE BASE AND TAX BURDEN 716

A. Bolat, A. Kassymova, D. Jangeldina, Zh. Kurmankulova

ECONOMIC EFFICIENCY OF INTERNATIONAL MEDIATION MECHANISMS IN NUCLEAR DISARMAMENT PROCESSES: COMPARATIVE ANALYSIS 732

A. Amanbekova

MERGERS AND ACQUISITIONS: THE ROLE OF DUE DILIGENCE IN M&A OUTCOMES . 749

Ш.А. Смагулова, С.З. Кажимуратова, Г.К. Койшинова, А.А. Жетписбаева, С.Т. Жакупова, М.Д. Ахметова

РАЗВИТИЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИКИ КАЗАХСТАНА 757

Қ.Қ. Мамутова, Ж.С. Машраб, А.Н. Айтымбетова

ЖАСЫЛ ЭКОНОМИКА: ESG ҚАҒИДАТТАРЫНА СҮЙЕНГЕН ЖАСЫЛ ОБЛИГАЦИЯЛАР, ЖАСЫЛ НЕСИЕЛЕР ЖӘНЕ ИНВЕСТИЦИЯЛАР 778

З.Т. Төребекова, Б.Н. Боқаев, А.Д. Бактияров, Н.Б. Айжарыков

ЦИФРЛАНДЫРУ ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ЖОҒАРЫ ОҚУ ОРЫНДАРЫНЫҢ ЖАҺАНДЫҚ БӘСЕКЕЛЕСТІККЕ ҚАБІЛЕТТІЛІГІН АРТТЫРУ ФАКТОРЫ РЕТІНДЕ: ЭКОНОМИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ АСПЕКТІЛЕР 792

МРНТИ 27.25.19 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1213**

ЖЕЛІ АРҚЫЛЫ ЖАЛҒАН КОНТЕНТТІ ТАСЫМАЛДАУДЫ ІЗДЕУ ҮШІН ЖЕЛІЛІК ТРАФИКТІ ТАЛДАУ

З.А. Сарсембаева, Г.И. Аймичева, А.Е. Назырова
Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Корреспондент-автор: 040203650680@enu.kz

Цифрлық технологиялар мен жасанды интеллекттің қарқынды дамуы жалған ақпарат таратудың жаңа мүмкіндіктерін ашты. Қазіргі уақытта жалған контентті анықтауға бағытталған зерттеулер көбінесе визуалды талдаумен шектеледі, ал желі деңгейінде оны анықтаудың тиімді әдістері жеткіліксіз зерттелген. Сондықтан бұл зерттеу жұмысының негізгі мақсаты желілік трафикті талдау арқылы жалған контентті, соның ішінде дипфейк мазмұнын анықтаудың тиімді техникалық әдістерін ұсыну болып табылады. Бұл жұмыста HTTP-трафикті талдау, файлдарды автоматты түрде шығару, MesoNet нейрондық желі моделі арқылы дипфейктерді анықтау әдістері қолданылды. Зерттеу барысында Scapy, PyTorch және Docker технологиялары пайдаланылды. Нәтижелер көрсеткендей, ұсынылған әдіс дипфейк-контентті желілік трафик деңгейінде нақты уақыт режимінде жоғары дәлдікпен анықтай алады. Жүйе қауіпті контентті автоматты түрде анықтап, Telegram арқылы жедел хабарландыру жібереді, бұл ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз етуде үлкен практикалық мәнге ие.

Түйін сөздер: жалған контент, дипфейктер, ақпараттық қауіпсіздік, желілік трафикті талдау, нейрондық желілер, Scapy, MesoNet, автоматты талдау, дезинформация, цифрлық криминалистика.

АНАЛИЗ СЕТЕВОГО ТРАФИКА ДЛЯ ПОИСКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛОЖНОГО КОНТЕНТА ЧЕРЕЗ СЕТЬ

З.А. Сарсембаева, Г.И. Аймичева, А.Е. Назырова
Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
e-mail: 040203650680@enu.kz

Стремительное развитие цифровых технологий и искусственного интеллекта открыло новые возможности для распространения ложной информации. Особенно в последние годы широко распространяется дипфейк-контент, не являющийся реальным, но визуально убедительный. В настоящее время исследования, направленные на выявление ложного контента, в основном ограничиваются анализом на визуальном уровне, тогда как методы его эффективного обнаружения на сетевом уровне изучены недостаточно. В связи с этим основной целью исследования является предложение эффективных технических подходов к выявлению ложного контента, включая дипфейки, посредством анализа сетевого трафика. В работе использовались методы анализа HTTP-трафика, автоматического извлечения файлов и определения дипфейков с помощью нейронной сети MesoNet. В ходе исследования применялись технологии Scapy, PyTorch и Docker. Результаты показали, что предложенный метод способен выявлять дипфейк-контент на уровне сетевого трафика в режиме реального времени с высокой точностью. Система автоматически определяет опасный контент и оперативно отправляет уведомления через Telegram, что имеет большое практическое значение для обеспечения информационной безопасности.

Ключевые слова: ложный контент, дипфейки, информационная безопасность, анализ сетевого трафика, нейронные сети, Scapy, MesoNet, автоматический анализ, дезинформация, цифровая криминалистика.

NETWORK TRAFFIC ANALYSIS FOR DETECTING THE DISTRIBUTION OF FALSE CONTENT OVER THE NETWORK

Z.A. Sarsembayeva✉, G.I. Aimicheva, A.Ye. Nazyrova
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
e-mail: 040203650680@enu.kz

The rapid development of digital technologies and artificial intelligence has opened up new opportunities for the dissemination of false information. In recent years, deepfake content, which is not authentic but visually convincing, has become widespread. Current studies on detecting false content are mostly limited to visual-level analysis, while effective methods for identifying it at the network level remain insufficiently explored. Therefore, the main objective of this research is to propose effective technical approaches for detecting false content, including deepfakes, through network traffic analysis. This study applied HTTP traffic analysis, automatic file extraction, and deepfake detection using the MesoNet neural network model. The research utilized Scapy, PyTorch, and Docker technologies. The results demonstrated that the proposed method can accurately detect deepfake content at the network traffic level in real time. The system automatically identifies malicious content and promptly sends alerts via Telegram, which has significant practical value for ensuring information security.

Keywords: false content, deepfakes, information security, network traffic analysis, neural networks, Scapy, MesoNet, automated analysis, disinformation, digital forensics.

Кіріспе. Қазіргі таңда жасанды интеллект пен ақпараттық технологиялардың дамуы арқасында жалған ақпараттың цифрлық кеңістікте таралу жылдамдығы мен күрделілігі күннен күнге артуда. Жалған контент тек әлеметтік желілерде ғана емес, сонымен қатар – форумдар, хабарламалар жүйесі және заңды сайттар арқылы да таралуда. Бүгінде жалған ақпарат тек мәтін немесе бейне түрінде ғана емес, мультимедиялық пішінде, яғни суреттер мен аудиофайлдар арқылы да берілуі мүмкін. Көзге шынайы көрінетін, бірақ шын мәнінде жалған болып келетін және адам өміріне, беделіне нұқсан келтіретін контентті алдын ала анықтап, оның таралуын тоқтату қазіргі кездегі ақпараттық қаіпсіздіктің басты мәселелерінің бірі.

Жалған контентті танудағы зерттеулер көбіне визуалды ерекшеліктерді анықтауға бағытталған, ал оларды ерте кезеңде анықтап, оның таралуына жол бермеу туралы зерттеулер қазіргі кезде аса көп қарастырылмаған және де тапшылық етуде. Бұл ақпараттық қауіпсіздік саласындағы маңызды кемшіліктердің бірі.

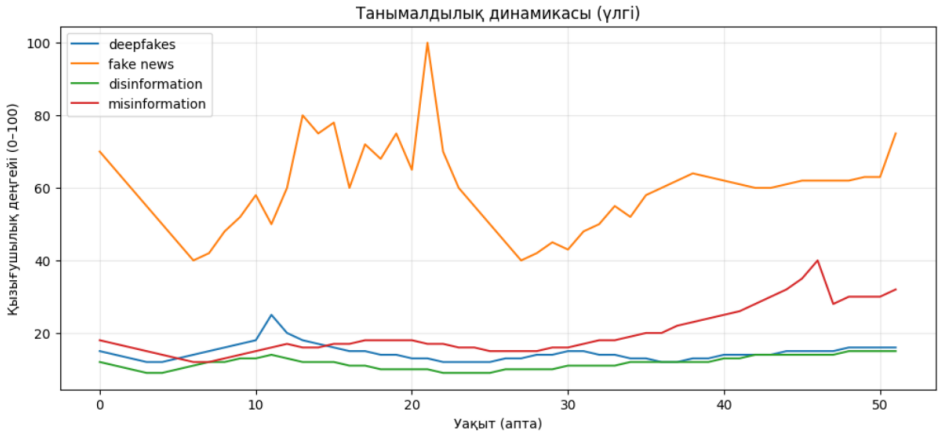
Осы себептен, бұл зерттеу жұмысының басты мақсаты – жалған контентті желілік трафикті талдау арқылы анықтау әдістерін ұсыну. Негізгі зерттеу сұрағы: желілік трафикті талдау арқылы жалған контенттің таралуын қалай тоқтатуға болады?

Әдебиетке шолу. Ақпараттық кеңістіктегі жалған контенттің таралуы қоғамдағы пікірді бұрмалап, халықтың шешім қабылдауына ықпал етеді. Соңғы зерттеулер көрсеткендей, психологиялық тұрғыдан әсерлі жалған контент адамдар арасында шыңайы ақпаратқа қарағанда 70%-ға жылдам таралады.

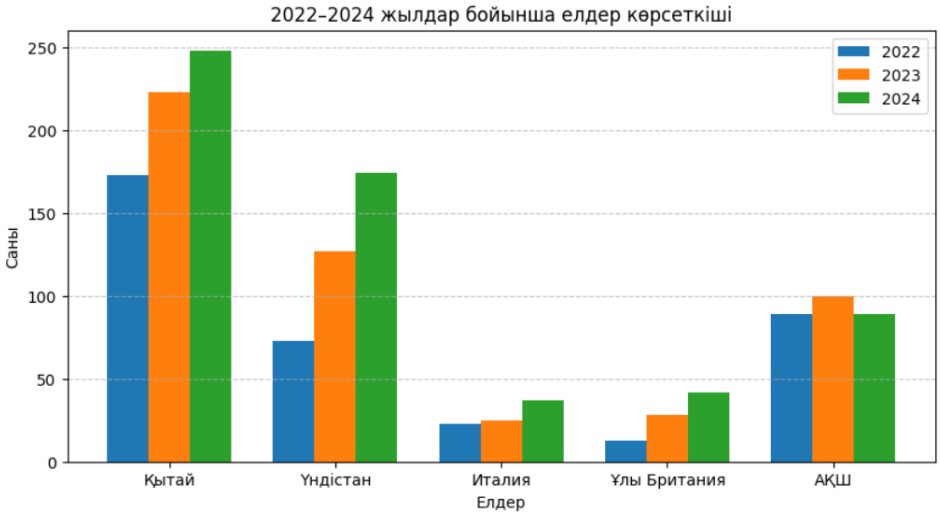
Google trends (https://trends.google.com/trends/) деректеріне сәйкес, «Fake news» (жалған жаңалықтар), «deepfakes» (жасанды бейнелер), «disinformation» (әдейі таралған жалған ақпарат) және «misinformation» (білместіктен таралған жалған ақпарат) сияқты сұраныстар адамдар арасында тұрақты қызығушылық тудыруда. Мұндай қызығушылықты әсіресі, саяси, әлеуметтік және экономикалық оқиғалар кезінде байқауға болады. Бұл халықтың жалған ақпаратқа алданып қалуына деген қорқынышын және дезинформация қаупын түсінуін көрсетеді.

Соңғы бірнеше жыл ішінде бұл терминдер бойынша іздеу белсенділігі жаһандық деңгейде ғана емес, Қазақстанда да айқын өсуде. Бұд құбылыс дезинформацияның тек халықаралық ауқымдағы мәселе екенін көрсетеді. Осы орай-

да, жалған контентпен күресуде тиімді техникалық құралдар мен әдістерді әзірлеу қажеттілігі барған сайын айқындала түсуде.



1-сурет. Google Trends мәліметтері бойынша жалған ақпарат және deepfakes тақырыптарына қызығушылық



2-сурет. Дипфейктер мен жасанды интеллект тақырыбы бойынша ғылыми жарияланымдардың елдер бойынша белсенділігі

Бұл зерттеу тақырыбы ғылыми ортада да кең танымалдылыққа ие. SciVal платформасының бибилеометриялық талдау деректеріне сүйінетін болсақ, 2022-2024 жылдар арасында дипфейк, терең оқыту және жасанды интеллект туралы мақалалар саны бұрынғымен қарағанда әрдеқайда артып келуде. Әсіресе бұл мәселеге Қытай, Үндістан, АҚШ, Италия және Ұлыбритания елдерінің ғалымдары ерекше көңіл бөлген. Жарияланымдар саны бойынша Қытай (644), Үндістан (374) және АҚШ (278) елдері көш бастап тұр. Ал Италия (85) және Ұлыбритания (83) елдері бір-бірінен қалыспай, алғашқы бестікті түйіндейді (сурет-2).

Материалдар мен әдістер. Желілік трафикті талдауға арналған NTMA әдістемесі арқылы жалған контентті анықтау. Желілік трафикті талдау – ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз ететін басты құралдардың бірі. Трафикті талдау арқылы әдеттен тыс нәрселерді (аномалияларды), заңсыз әрекеттерді, фишингтік ша-

буылдарды және жалған ақпаратты тарату арналарын анықтауға болады. Соңғы жылдары әлеуметтік желі арқылы жалған ақпараттың көбеюі және де зиянды бағдарламалардың таралуының өсуіне байланысты бұл талдаудың ғылыми тұрғыдағы маңызы арта түсуде. Желілік құрылымдардың күрделенуі және деректерді шифрлау әдістерінің жетілуі дәстүрлі тексеру құралдарының қолдану аясын шектеп, жаңа тәсілдерді талап етуде. Сондықтан, машиналық оқыту мен терең оқытуға негізделген әдістерді қолдану қажеттілігі артуда.

NTMA (Network Traffic Monitoring and Analysis), яғни желілік трафикті бақылау және талдау – бұл желінің қозғалысын ең ұсақ бөлшектерге дейін бақылауға мүмкіндік беретін әдістер жиынтығы. Бұл тәсіл желінің жұмысын және өнімділігін терең зерттеуге, сондай-ақ пайдаланушылардың желідегі әрекеттерін талдауға мүмкіндік береді [1]. Коммуникациялық жүйелер мен желілер тұрғысынан алғанда NTMA өте маңызды рөл атқарады. Ол желілердің қалай жұмыс істейтінін түсінуге, олардың өнімділігін бақылауға, ресурстарды тиімді пайдалануды, оңтайландыруды және телекоммуникациялық инфрақұрылымды SLA (Service Level Agreement – қызмет көрсету деңгейі туралы келісім) талаптарына сәйкес басқаруға көмектеседі.



3-сурет. NTMA процедурасының құрылымы

Машиналық оқыту мен терең оқыту әдістерін пайдалану арқылы NTMA жүйелері желілік аномалияларды автоматты түрде анықтай алады. Терең оқыту (Deep Learning) белгілерді автоматты түрде шығарып, деректердегі жасырын заңдылықтарды анықтау үшін қолданылады. Бұл технология үлкен көлемдегі деректерді талдау отырып, модельдердің жұмыс тиімділігін арттырады және дәстүрлі машиналық оқыту әдістерінен бір саты жоғары тұрады [1].

NTMA желі ресурстарын басқаруда және қауіпсіздікті қамтамасыз етуде басты құрал болып саналады. Терең оқыту әдістерін пайдалану желі трафигін талдау міндеттерін қазіргі коммуникациялық жүйелердің жоғары жылдамдық пен сенімділік талаптарына сай шешуге көмектеседі.

Машиналық оқыту шифрланған трафикті талдауға NTMA-ны бейімдеуде маңызды рөл атқарады. Әдеттен тыс жағдайларды (аномалияларды) анықтау үшін көбінесе автоэнкодерлер пайдаланылады, олар жүйенің қалыпты міңез-құлқынан ауытқуын бірден байқайды. Сондай-ақ, K-орташа кластерлеу сияқты бақылаусыз әдістерге негізделген кластерлеу трафиктің жаңа үлгілерін табуға ат салысады. Мысалы, автоэнкодерлерді шифрланған ағындарды тексеруге қолдану HTTPS арқылы деректерді жасырын шығары әрекеттерін анықтауға мүмкіндік берді [1,2].

Желілік трафикті талдауда Deep Packet Inspection (DPI) және NetFlow әдістерінің үлесі зор. Бұл әдістердің әрқайсысы желідегі ақпарат ағындарын зерттеуде өзіндік ерекшеліктермен көзге түскен.

Deep Packet Inspection (DPI) - бұл желі арқылы өтетін пакеттердің ішкі мазмұнын толықтай тексеруге мүмкіндік беретін технология. Яғни, қарапайым сөзбен айтқанда, ол тек пакеттің тақырыбын ғана емес, сонымен қатар оның ішкі құрылымында талдайды. DPI-дің басты артықшылықтарының бірі - желідегі заңсыз әрекеттерді, шифрланған трафиктегі күдікті үлгілерді және зиянды бағдарламаларды анықтау қабілеті. Бұл әдіс қауіпсіздік жүйелерінде, атап айтқанда IDS (Intrusion Detection Systems - шабуылды анықтау жүйелері) және IPS (Intrusion Prevention Systems - шабуылды алдын алу жүйелері) белсенді қолданылады [2].

NetFlow - желілік трафиктің құрылымдық си-

паттамаларын талдауға арналған Cisco компаниясы әзірлеген технология. Ол аномалияларды табу үшін трафик ағындарының статистикалық мәліметтерін жинайды. NetFlow - DDos шабуылдарын, ботнеттердің белсенділігін, және фишингтік шабуылдарды айқындауда тиімді болып табылады.

DPI мен NetFlow тәсілдерін бірге қолдану арқасында желілік қауіпсіздікті қамтамасыз ету оң нәтижелер береді. DPI арқылы пакеттердің ішкі мазмұнына назар аударсақ, NetFlow арқылы трафик ағындарының құрылымдық параметрлерін талдап, желідегі күдікті мінез-құлықты анықтауға болады. Осы тәсілдердің бірігуі желідегі заңсыз әрекеттерді, зиянды бағдарламаларды және жалған ақпаратты тарату арналарының белсенділігін жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік береді [3].

Көпмодальды тәсілдер дегеніміз – әртүрлі ақпарат түрлерін (мәтін, сурет, бейне, аудио) біріктіріп талдауға негізделген әдістер. Көпмодальды әдістерді пайдалану арқылы жалған ақпаратты таратудың бірнеше негізгі бағыты пайда болған. Біріншіден, әлеуметтік желілер мен жаңалықтарда тек мәтіндік контент ғана емес, сонымен қатар суреттер мен бейнелер белсенді қолданылады. Мұндай медиалық элементтер жалған ақпараттың шыңайлылық деңгейін күшейту мақсатында жасалады [4].

Көпмодальды тәсілдердің желілік криминалистикадағы маңызы зор. Себебі, жалған ақпарат таратушылар көбіне тек бір ғана дереккөзбен шектелмей, бірнеше арнаны бір мезгілде қолданады. Мысалы, әлеуметтік желілердегі жалған жаңалықтар көбінесе мәтін, сурет және бейне форматтарында қатар беріледі және олардың арасында өзара логикалық байланыс болады. Осы байланыстарды толыққанды талдау үшін көпмодальды әдістерді қолданамыз.

Жалған ақпаратты көпмодальды әдістер арқылы анықтауда машиналық оқыту мен терең оқыту әдістері белсенді қолданылады. Бұл әдістер әртүрлі дереккөздерден алынған ақпаратты біріктіруге және олардың арасындағы айырмашылықтарды анықтауға мүмкіндік береді [5].

Бұл бағыттағы негізгі модельдердің бірі - GNN (Graph Neural Networks - графтық нейрондық желілер). GNN ақпараттың таралу жолдарын зерттеп, күмәнді байланыстарды анықтауға көмектеседі. Бұл модельден бөлек, визуалды контентті өңдеу үшін CNN (Convolutional Neural Netwoorks – конволюциялық нейрондық желілер) және мәтіндік және аудиофайлдарды талдау үшін LSTM (Long Short-Term Memory ұзақ мерзімді жады) модельдері қолданылады. Жалған контентті талдауда қолданылатын әдістердің тиімділігі мен тәжірибелік маңызын негіздеу мақсатында [5-7] әдебиеттердегі ғылыми мақалаларға талдау жасалды, нәтижесі 1-кестеде ұсынылған.

Көпмодальды тәчілдерді қолдану кезінде ерекше назар аударуға тұрарлық тағы бір аспект - кросс-модальды сәйкессіздіктерді анықтау. Бұл операциялар әртүрлі ақпарат көздері арасындағы сәйкестікті бағалауға мүмкіндік береді. Мысалы, хабарлама мәтіні бір оқиға туралы, бірақ оған тіркелген бейне басқа оқиға туралы болуы мүмкін. Мұндай айырмашылықтарды автоматты түрде анықтау үшін көпмодальды нейрондық желіліер қолданылады [8].

1-кесте. Көпмодальды терең оқыту архитектураларының сипаттамасы

Архитектура	Сипаттамасы	Қолдану салалары	Жалған контентті анықтаудағы өзектілігі
Көпқабатты персептрон (MLP)	Тығыз қабаттардан тұрады, әр қабат деректердің жаңа түрін береді.	Мәтінді, суретті және дыбысты біріктіру үшін қолданылатын негізгі әдіс.Әр түрлі дереккөздерді синхрондау және олардан алынған ақпаратты біріктіру.	Жалған немесе бұрмаланған мазмұнды көрсететін метадеректердегі ауытқуларды анықтау

Конволюциялық нейрондық желілер (CNN)	Уақыт қатарлары немесе кеңістіктік деректер сияқты тор деректер құрылымдарын өңдеуге арналған, ол жергілікті үлгілерді (мысалы, кластер өлшемі, ұзақтығы) бөлектейді.	Суреттер мен бейнелерді өңдеу, бейнелерді мәтінмен байланыстыру және мазмұн үйлесімділігін тексеру.	Жасанды мазмұнды жеткізуге байланысты орындалатын пакеттік үлгілер мен пайдалы жүктеме шабуылдарында оғаш ауытқуларды анықтау
Рекуррентті нейрондық желілер (RNN)	Деректерді ретімен өңдейді. RNN алдыңғы кірістердің «есту қабілетін» сақтайды, уақыт реттілігін талдау үшін қолайлы етеді.	Мәтіндік және дыбыстық деректерді уақытша байланыстар бойыншы зерттеу, жалған хабарламаларды сұрыптау	Деректер ағынындағы уақытша сәйкессіздіктерді қадағалау арқылы жалған немесе өзгертілген мазмұнды анықтайды
Ұзақ мерзімді жады (LSTM)	RNN-ге ұқсас, градиент жоғалуымен байланысты мәселелерді шешеді. Тізбектердегі ұзақ мерзімді маусымдық тәуелділіктерге мамандандырылған.	Уақыт бойынша деректердің өзгеруін талдау, мәтін мен аудио контент арасындағы байланысты зерттеу	Уақыт өте келе өзгертілген немесе жалған ақпаратқа тән ауытқуды анықтау.
Гейттелген рекуррентті блоктар (GRU)	LSTM-нің жеңілдетілген нұсқасы, есептеу ресурстарын аз талап етеді, бірақ тізбекті деректерді өңдеуде ұқсас қабілеттерге ие	Мәтін, аудио және бейнелерді LSTM-ге қарағанда тезірек талдайды.	Жалған мазмұнды тарату-дағы трафик үлгілеріндегі қарапайым айырмашылықтарды анықтайды.
Автоэнкодерлер	Бақылаусыз оқыту үшін қолайлы архитектура. Кіріс деректерін қысылған көріністерге кодтауға және оларды қайта құруға үйретілген нейрондық желілер	Әртүрлі дереккөздерден алынған ақпаратты қысу және олардың арасындағы заңдылықтарды тану	Қайта құрастырылған деректердің бұрмалануымен байланысты сәйкессіздіктер мен ауытқуларды анықтау
Терең генеративті модельдер	Вариациялық автоэнкодерлер (VAE) және генеративті қарсылас желілер (GAN) сияқты әдістерді қамтиды.	Генеративті модельдерді қолданып, дипфейкті құрады және оны анықтау үшін кері талдау жүргізеді.	Жалған трафикті имитациялау немесе сенімділікті тексеру үшін қарсы нүктелерді жасау үшін үлгілерді үйрету
Гибридті модельдер (CNN-RNN)	CNN кеңістік ерекшеліктерін және RNN уақытша модельдеуін біріктіреді.	Жалған контенттің сәйкестігін сурет, мәтін және аудионы өңдеу арқылы тексереді	Кеңістіктік және уақыттық белгілерді біріктіру арқылы жалған контенттің таралуындағы күрделі заңдылықтарды анықтау
Ансамбльдік модельдер	Бірнеше архитектураның артықшылықтарын пайдалану үшін, оларды бір модельге біріктіреді.	Мәтін,сурет және дыбыс арасындағы үйлесімділікті айқындау үшін бірнеше үлгілердің нәтижелерін біріктіру	Жалған контентті анықтау үшін бірнеше тәсілдерді біріктіріп қолданады.

Көпмодальды тәсілдердің тағы бір маңызды артықшылығы - статистикалық талдау мен мазмұнды бағалау үйлесімі. Бұл тәсіл мазмұнды тарату динамикасын және оның пайдаланушыға әсерін зерттеуге мүмкіндік береді. Әлеуметтік желілердегі тенденцияларды талдай отырып, жалған ақпараттың таралу жылдамдығын және оның аудиториясын анықтауға болады. Бұл талдау тәсілі жалған ақпараттың табиғатын зерттеуге және оның таралуын алдын алуға мүмкіндік береді [9].

Нәтижелер және талқылау. Эксперименттік жұмыстың мақсаты - жалған контентті анықтау үшін желілік трафикті талдауға арналған кешенді шешім құру. Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды:

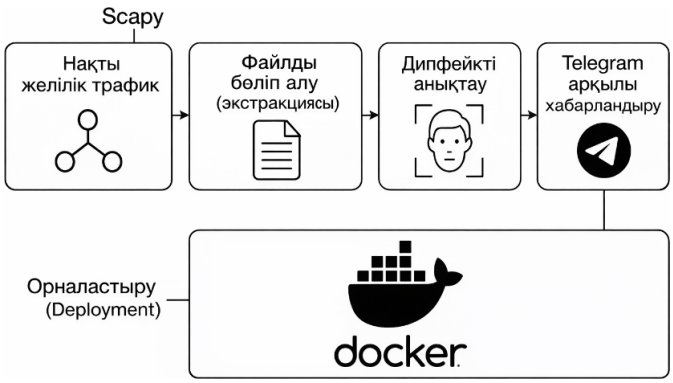
1. HTTP-трафигін сенімді түрде ұстап қалу;

2. Трафиктен автоматты түрде медиафайлдарды бөліп алу;

3. Таңдалған нейрондық желі арқыла медиаконтентті талдау;

4. Күдікті медиафайл табылған жағдайда, Telegram bot арқылы хабарлама жіберу.

Бұл күрделі шешімді жүзеге асыру үшін Scapy, PyTorch және Docker технологиялары таңдалған болатын.

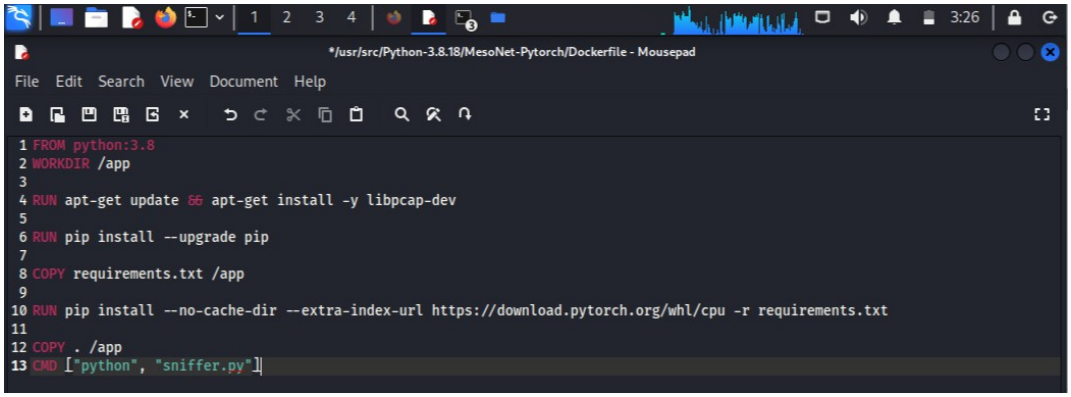


4-Сурет. Жүйенің жалпы құрылымы

Жалған контентті анықтау үшін медиафайлдардағы өте ұсақ бөлшектерді талдай алатын конволюциялық нейрондық желіні қолданатын MesoNet моделі таңдалған болатын. Бұл модельдің басты ерекшелігі - аз есептеу қуатын қамтамасыз етеді және жалған контентті анықтау дәлдігі жоғары.

Қадам 1. Ортаны дайындау. Жүйенің кез келген жерде бірдей және сенімді жұмыс жасауын қамтамасыз ету үшін Docker технологиясы қолданылды.

Практикалық жұмыста барлық қажет кітапханаларды тұрақты түрде қолдану мақсатында dockerfile ресми python:3.8 бейнесіне негізделген болатын. Dockerfile үздік әзірлеу тәжірибелерін ескере отырып жасалған. Мұнда pip-ті жаңарту, барлық қажетті кітапханаларды орнату (requirements.txt), негізгі кодтарды (sniffer.py, deepfake_detector.py және т.б) контейнерге көшіру сияқты кезеңдер жазылған.



5-сурет. Dockerfile құрылымы

Қадам 2. Қажетті құралдар мен кітапханалар тізімі - requirements.txt

Жүйе жұмысын қамтамасыз ету үшін қажетті кітапханалар тізімі жасалған болатын. Requirements.txt тізімі келесі құралдар мен кіта-

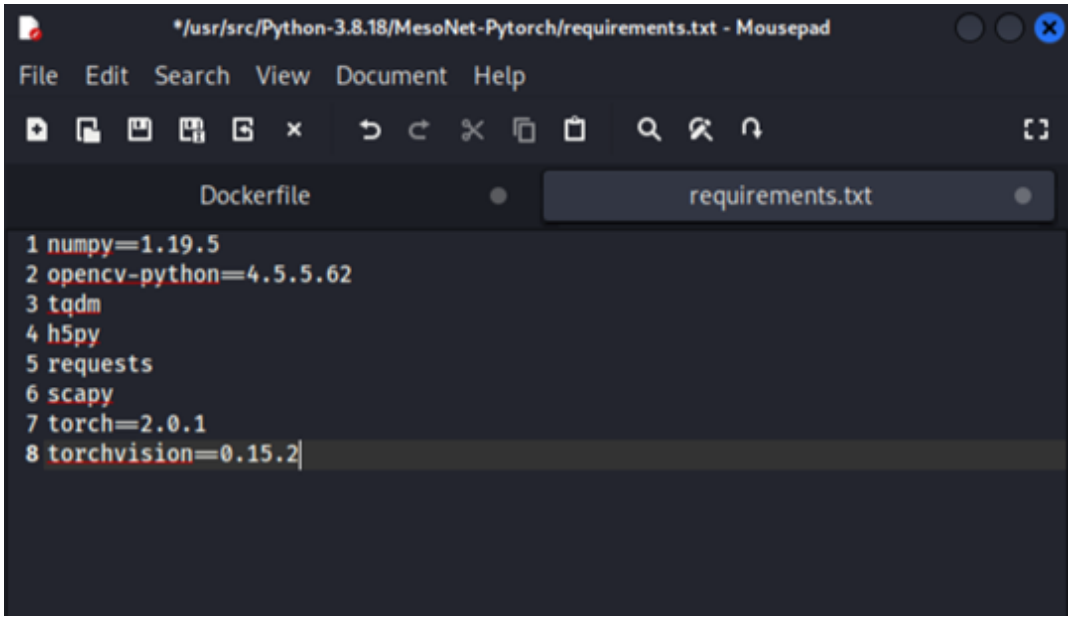
пханаларды қамтиды:

1. Scapy - желілік трафикті талдауға арналған python кітапханасы.

2. PyTorch - терең машиналық оқыту модельдерін құру және жаттықтыруға арналған кітапхана (CPU-есептеулеріне ыңғайлы нұсқасы көрсетілген).

3. Requests - Telegram bot API-мен байланысу үшін.

4. OpenCV - суреттер мен бейнелерді өңдеуге арналған кітапхана.



6-сурет. Requirements.txt мазмұны

Қадам 3. Практикалық іске асыру: негізгі скриптің жұмыс принципі.

Практикалық іске асыру python коды арқылы жүзеге асырылады.

Листинг 1. HTTP трафигін ұстап қалу және толық жауапты жинау

```
from scapy.all import sniff, TCP, Raw, IP
def packet_callback(pkt):
    if not (pkt.haslayer(TCP) and pkt.haslayer(Raw) and pkt.haslayer(IP)):
        return
    ip_layer = pkt[IP]
    tcp_layer = pkt[TCP]
    if tcp_layer.sport != PORT: return
    payload = bytes(pkt[Raw].load)
    conn_key = (ip_layer.src, tcp_layer.sport, ip_layer.dst, tcp_layer.dport)
    if conn_key not in responses:
        if payload.startswith(b"HTTP/1.") and b" 200 " in payload[:15]:
            responses[conn_key] = payload
    else:
        responses[conn_key] += payload
        buf = responses[conn_key]
        if b"\r\n\r\n" in buf:
            head_end = buf.find(b"\r\n\r\n")
            headers_raw = buf[:head_end]
```

```
            for line in headers_raw.decode("latin-1").split("\r\n"):
                if line.lower().startswith("content-length:"):
                    content_length = int(line.split(":",1)[1].strip())
                    break
            body_size = len(buf) - (head_end+4)
            if content_length and body_size >= content_length:
                process_full_response(buf, conn_key)
```

Бұл код бөлігі HTTP жауаптарын толық жинауға арналған. Ол әрбір TCP пакетін өңдеп, жауаптың толық денесін жинайды.

Листинг 2. Суретті сақтап, дипфейкке тексеру

```
def save_and_analyze_image(data_bytes: bytes, content_type: str):
    ext = ".jpg" if "jpeg" in content_type else ".png"
    filename = f"sniffed_{file_counter}{ext}"
    file_path = os.path.join(SAVE_DIR, filename)
    with open(file_path, "wb") as f:
        f.write(data_bytes)

    is_fake = deepfake_detector.is_deepfake(file_path)
    if is_fake:
        notify_telegram(f"Deepfake detected in file: {filename}")
```

Бұл функция екі маңызды істі атқарады. Бірінші ден, суретті жеке файл ретінде сақтайды. Екінші ден, сақталған суретті deepfake_detector модулі арқылы тексереді. Сурет дипфейк деп таңылған жағдайда, Telegram арқылы хабар жіберіледі.

Листинг 3. MesoNet моделы

```
def is_deepfake(image_path):
    image = Image.open(image_path).convert('RGB')
    image = mesonet_data_transforms['val'](image)
    image = image.unsqueeze(0).to(device)
    with torch.no_grad():
        output = model(image)
    _, pred = torch.max(output.data, 1)
    return pred.item() == 1
```

MesoNet моделі медиафайлды дипфейк деп анықтаған жағдайда true мәнін қайтарады [10].

Листинг 4. Telegram арқылы хабарлама жіберу

```
def notify_telegram(message: str):
    url = f"https://api.telegram.org/bot{TELEGRAM_TOKEN}/sendMessage"
    requests.post(
        url,
        data={
            "chat_id": TELEGRAM_CHAT_ID,
            "text": message
        },
        timeout=5
    )
```

Қадам 4. Docker контейнерін іске қосу

Жасалған сниффердi docker ішінде қосу үшін желіге толық қолжетімділік беру қажет. Сондықтан --network=host және --cap-add=NET_ADMIN опцияларын қолданамыз. Бұл Scapy-ге http трафигін ешқандай кедергісіз өңдеуге мүмкіндік береді.

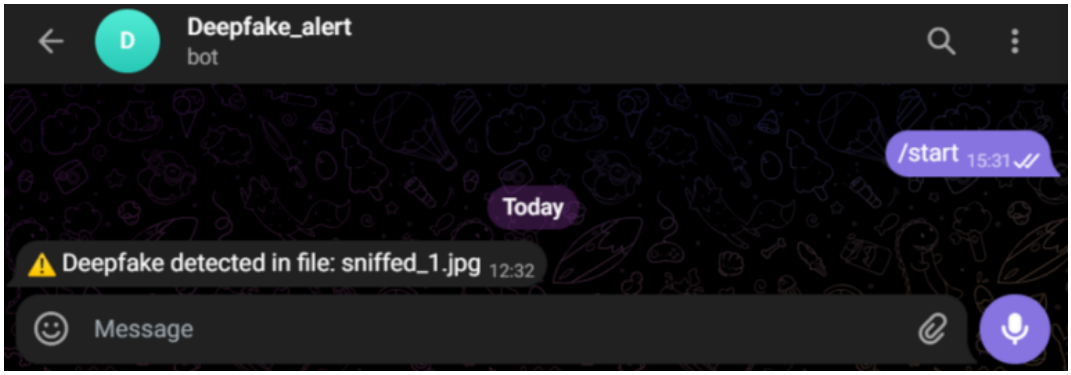
```
┌──(kali㉿kali)-[~]
└─$ sudo docker run --network=host --cap-add=NET_ADMIN http-sniffer

2025-03-18 07:32:23,937 [INFO] [*] Starting sniffer on iface='lo', port=8080
2025-03-18 07:32:31,870 [INFO] [NEW] Http200 from ('127.0.0.1', 8080, '127.0.0.1', 38726)
2025-03-18 07:32:31,877 [INFO] [COMPLETE] ('127.0.0.1', 8080, '127.0.0.1', 38726), body_size=5762, content_length=5574
2025-03-18 07:32:31,878 [INFO] [HEADERS] Content-Type=image/jpeg, Content-Length=5574
2025-03-18 07:32:31,879 [INFO] [INFO] We have 5574 bytes in body, expected 5574
2025-03-18 07:32:31,880 [INFO] [+] Saved 5574 bytes to /tmp/sniffed_1.jpg
/usr/local/lib/python3.8/site-packages/torch/nn/functional.py:1331: UserWarning: dropout2d: Received a 2-D input to dropout2d,
 which is deprecated and will result in an error in a future release. To retain the behavior and silence this warning, please
use dropout instead. Note that dropout2d exists to provide channel-wise dropout on inputs with 2 spatial dimensions, a channel
 dimension, and an optional batch dimension (i.e. 3D or 4D inputs).
  warnings.warn(warn_msg)
2025-03-18 07:32:32,161 [INFO] [Deepfake] result for sniffed_1.jpg: True
2025-03-18 07:32:32,176 [DEBUG] Starting new HTTPS connection (1): api.telegram.org:443
2025-03-18 07:32:32,620 [DEBUG] https://api.telegram.org:443 "POST /bot7794837166:AAGQBl72rKX04w1-QRknnqJjpz_H2TcxJHM/sendMess
age HTTP/11" 200 297
2025-03-18 07:32:32,620 [INFO] [Telegram] Notification sent.
```

7-сурет. Контейнерді желіге қосу конфигурациясы

Қадам 5. Дипфейк анықталған кезде Telegram арқылы хабарлама жіберу

Дипфейк анықталған кезде жүйе автоматты түрде Telegram боты арқылы хабарлама жіберді. Бұл механизм бізге қауіп-қатерге мүмкіндігінше тез жауап беруге және шешім қабылдауға мүмкіндік берді.



8-сурет. Телеграм хабарламасы

Эксперимент нәтижелері біз таңдаған әдістің тиімділігін толық растады: трафикті ұстап қалудан бастап хабарлама жіберуге дейінгі барлық қадамдар қатесіз және жылдам орындалды.

Қорытынды. Бұл зерттеу жұмысы қойылған мақсаттарға жетіп, жалған ақпаратпен күресте өз үлесін қосуға және ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз етуде тиімді қолдана алатынын көрсетті. Scapy, PyTorch, Docker технологияларын қолдану арқасында желілік трафикті талдап, жасанды контентті тауып алуға арналған автоматтандырылған кешенді жүйе құрылды. Жоба әзірге тек http трафигімен ғана шектелгенімен, болашақта басқа хаттамалармен де интеграцияланады және талдау дәлдігін арттырады деп үміттенеміз. Жасанды интеллектпен машиналық оқытудың алдағы жетістіктері бұл шешімнің тиімділігін арттырып, әртүрлі салаларда қолданылуына мүмкіндік береді. Зерттеу жұмысының барысында құрылған жүйе болашақта SOC және CERT сияқты құрылымдарда пайдалануға бейімделген. Алдағы зерттеулер желілік

трафикті тереңірек талдауды, шифрланған протоколдармен жұмыс істеуді қамтамасыз етуі керек. Бұл бағыттағы зерттеу жұмыстарының арқасында дезинформациямен күресте жаңа деңгейге шығуға мүмкіндік пайда болады.

Әдебиеттер

1. Abbasi M., Shahraki A., Taherkordi A. Deep learning for network traffic monitoring and analysis (NTMA): A survey// Computer Communications. -2021. -Vol.170. -P.19-41. DOI 10.1016/j.comcom.2021.01.021.

2. Bayat N., Jackson W., Liu D. Deep learning for network traffic classification// arXiv preprint. -2021. -No. arXiv:2106.12693. DOI: 10.48550/arXiv.2106.12693.

3. Alanazi S., Asif S. Exploring deepfake technology: creation, consequences and countermeasures// Human-Intelligent Systems Integration. -2024. -Vol.6.-P.49–60. DOI 10.1007/s42454-024-00054-8.

4. Shen Y., et al. Fake news detection on social networks: a survey // Applied Sciences. -2023. -Vol.13(21): 11877. DOI 10.3390/app132111877.

5. Sattarov O., Choi J. Detection of rumors and their sources in social networks: a comprehensive survey// IEEE Transactions on Big Data.-2024.-Vol.11(3) DOI 10.1109/TBDATA.2024.3522801.

6. Gambín Á. F., Yazidi A., Vasilakos A., et al. Deepfakes: current and future trends// Artificial Intelligence Review. -2024. -Vol.57:64. DOI 10.1007/s10462-023-10679-x.

7. Meel P., Raj C., Bhawna. A review of web infodemic analysis and detection trends across multi-modalities using deep neural network // International Journal of Data Science and Analytics. -2025. -Vol. 20(5). -P.4149–4176. DOI 10.1007/s41060-025-00727-w.

8. Zannettou S., et al. The web of false information: Rumors, fake news, hoaxes, clickbait, and various other shenanigans// Journal of Data and Information Quality (JDIQ). -2019. -Vol.11(3). -P.1-37. DOI 10.1145/3309699.

9. Alwhbi I. A., Zou C. C., Alharbi R. N. Encrypted network traffic analysis and classification utilizing machine learning// Sensors. -2024. -Vol.24(11): 3509. DOI 10.3390/s24113509.

10. Liu Honggu. MesoNet-Pytorch. -2019. URL: https://github.com/HongguLiu/MesoNet-Pytorch/tree/master. -Қаралған күні: 19.09.2025.

References

1. Abbasi M., Shahraki A., Taherkordi A. Deep learning for network traffic monitoring and analysis (NTMA): A survey// Computer Communications. -2021. -Vol.170. -P.19-41. DOI 10.1016/j.comcom.2021.01.021.

2. Bayat N., Jackson W., Liu D. Deep learning for network traffic classification// arXiv preprint. -2021. -No. arXiv:2106.12693. DOI 10.48550/arXiv.2106.12693.

3. Alanazi S., Asif S. Exploring deepfake technology: creation, consequences and countermeasures// Human-Intelligent Systems Integration. -2024. -Vol.6.-P.49-60. DOI 10.1007/s42454-024-00054-8.

4. Shen Y., et al. Fake news detection on social networks: a survey // Applied Sciences. -2023. -Vol.13(21):11877. DOI 10.3390/app132111877.

5. Sattarov O., Choi J. Detection of rumors and their sources in social networks: a comprehensive survey// IEEE Transactions on Big Data -2024.-Vol.11(3) DOI 10.1109/TBDATA.2024.3522801.

6. Gambín Á. F., Yazidi A., Vasilakos A., et al. Deepfakes: current and future trends// Artificial Intelligence Review. -2024. -Vol.57: 64. DOI 10.1007/s10462-023-10679-x.

7. Meel P., Raj C., Bhawna. A review of web infodemic analysis and detection trends across multi-modalities using deep neural network // International Journal of Data Science and Analytics. -2025. -Vol. 20(5). -P.4149-4176. DOI 10.1007/s41060-025-00727-w.

8. Zannettou S., et al. The web of false information: Rumors, fake news, hoaxes, clickbait, and various other shenanigans// Journal of Data and Information Quality (JDIQ). -2019. -Vol.11(3). -P.1-37. DOI 10.1145/3309699.

9. Alwhbi I. A., Zou C. C., Alharbi R. N. Encrypted network traffic analysis and classification utilizing machine learning// Sensors. -2024. -Vol.24(11): 3509. DOI 10.3390/s24113509.

10. Liu Honggu. MesoNet-Pytorch. -2019. URL: https://github.com/HongguLiu/MesoNet-Pytorch/tree/master. -Қаралған күні: 19.09.2025.

Авторлар туралы мәлімет

Сарсембаева З. - магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: 040203650680@enu.kz;

Аймичева Г. - PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: aimicheva_gi_1@enu.kz;

Назырова А. - PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,Астана, Қазақстан, e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz.

Information about the authors

Sarsembayeva Z.– Master’s student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: 040203650680@enu.kz;

Aimicheva G. - PhD, senior, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: aimicheva_gi_1@enu.kz;

Nazyrova A. - PhD, senior lecturer , L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz.

IRSTI 27.47.23, 28.23.29, 15.21.69 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1213**

ARCHITECTURE AND APPLICATION OF A BIOTECHNICAL SYSTEM FOR HUMAN PSYCHOPHYSIOLOGICAL TESTING

[1]A.T. Mazakova, [1]Sh.A. Jomartova, [1,2]T.Zh. Mazakov✉, [3]B. Zhao, [1]A.M. Abubakirov

[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
[2]International University of Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan,
[3] Dalian Polytechnic University, Dalian, China

✉ *Corresponding author: tmazakov@mail.ru*

This article examines the architecture and practical application of a biotechnical system for human psychophysiological testing, designed to objectively assess the functional and psychoemotional state of an individual during psychological testing. The relevance of this research stems from the increasing role of the human factor in ensuring the reliability and safety of modern technical and organizational systems, as well as the need to integrate instrumental diagnostic methods into professional selection, personnel certification, and functional state monitoring.

The proposed biotechnical system implements an integrated approach combining hardware recording of physiological signals (electrocardiograms and photoplethysmograms) and software automation of psychological testing, followed by intelligent data processing. The system' s architecture is modular and includes a hardware subsystem for recording biomedical signals, a microprocessor-based primary processing module, a data transmission interface, and a software platform for analysis, visualization, and reporting.

The study developed algorithms for digital processing of biomedical signals, including multi-stage filtering, artifact suppression, cardiac cycle segmentation, detection of characteristic ECG points, photoplethysmogram analysis, calculation of heart rate variability parameters, wavelet analysis of non-stationary components, and the generation of an extended vector of diagnostic features. An ensemble classification model is used for intelligent data interpretation, ensuring robust recognition of psychophysiological states in the face of interindividual variability in physiological parameters.

The results of the experimental testing confirm the viability of the proposed architecture and the practical applicability of the biotechnical system for tasks of professional selection, personnel certification, and functional monitoring in technically complex and socially responsible areas of activity.

Keywords*:* biotechnical system, psychophysiological testing, electrocardiogram, photoplethysmogram, heart rate variability, digital signal processing, intelligent diagnostics.

АДАМНЫҢ ПСИХОФИЗИОЛОГИЯЛЫҚ ТЕСТІЛЕУІНЕ АРНАЛҒАН БИОТЕХНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕНІҢ АРХИТЕКТУРАСЫ ЖӘНЕ ҚОЛДАНЫЛУЫ

[1]А.Т. Мазакова, [1]Ш.А. Джомартова, [1,2]Т.Ж. Мазаков✉, [3]Б. Чжао, [1]А.М. Абубакиров

[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан,
[2]Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Алматы, Қазақстан,
[3]Далянь политехникалық университеті, Далянь, Қытай,
e-mail: tmazakov@mail.ru

Бұл мақалада психологиялық тестілеу кезінде жеке тұлғаның функционалдық және психоэмоционалдық жағдайын объективті бағалауға арналған адамның психофизиологиялық тестілеуіне арналған биотехникалық жүйенің архитектурасы мен практикалық қолданылуы қарастырылады. Бұл зерттеудің өзектілігі заманауи техникалық және ұйымдастырушылық жүйелердің сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі адам факторының рөлінің артуынан, сондай-ақ аспаптық диагностикалық әдістерді кәсіби іріктеуге, персоналды сертификаттауға және функционалдық жағдайды бақылауға біріктіру қажеттілігінен туындайды.

Ұсынылған биотехникалық жүйе физиологиялық сигналдарды (электрокардиограммалар мен фотоплетизмограммалар) аппараттық жазуды және психологиялық тестілеуді бағдарламалық автоматтандыруды біріктіретін интеграцияланған тәсілді жүзеге асырады, содан кейін интеллектуалды деректерді өңдеу жүзеге асырылады. Жүйенің архитектурасы модульдік болып табылады және биомедициналық сигналдарды жазуға арналған аппараттық ішкі жүйені, микропроцессорға негізделген бастапқы өңдеу модулін, деректерді беру интерфейсін және талдау, визуализациялау және есеп беру үшін бағдарламалық платформаны қамтиды. Зерттеу барысында биомедициналық сигналдарды сандық өңдеу алгоритмдері әзірленді, оның ішінде көп сатылы сүзгілеу, артефактіні басу, жүрек циклін сегменттеу, ЭКГ-ға тән нүктелерді анықтау, фотоплетизмограмманы талдау, жүрек соғу жиілігінің өзгергіштік параметрлерін есептеу, стационар емес компоненттердің толқындық талдауы және диагностикалық белгілердің кеңейтілген векторын жасау. Ансамбльдік жіктеу моделі физиологиялық параметрлердегі жеке аралық өзгергіштік болған кезде психофизиологиялық күйлерді сенімді тануды қамтамасыз ететін интеллектуалды деректерді түсіндіру үшін қолданылады.

Эксперименттік сынақ нәтижелері ұсынылған архитектураның өміршеңдігін және биотехникалық жүйенің техникалық тұрғыдан күрделі және әлеуметтік жауапты салаларда кәсіби іріктеу, персоналды сертификаттау және функционалдық мониторинг үшін практикалық қолданылуын растайды.

Түйін сөздер: биотехникалық жүйе, психофизиологиялық тестілеу, электрокардиограмма, фотоплетизмограмма, жүрек соғу жиілігінің өзгергіштігі, сандық сигналдарды өңдеу, интеллектуалды диагностика.

АРХИТЕКТУРА И ПРИМЕНЕНИЕ БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

[1]А.Т. Мазакова, [1]Ш.А. Джомартова, [1,2]Т.Ж. Мазаков✉, [3]Б. Чжао, [1]А.М. Абубакиров

[1]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
[2]Международный инженерно-технологический университет, Алматы, Казахстан,
[3]Даляньский политехнический университет, Далянь, Китай,
e-mail: tmazakov@mail.ru

В статье рассматривается архитектура и практическое применение биотехнической системы психофизиологического тестирования человека, предназначенной для объективной оценки функционального и психоэмоционального состояния личности в процессе выполнения психологических тестовых заданий. Актуальность исследования обусловлена возрастающей ролью человеческого фактора в обеспечении надёжности и безопасности современных технических и организационных систем, а также необходимостью внедрения инструментальных методов диагностики в процессы профессионального отбора, аттестации персонала и мониторинга функционального состояния человека.

Предложенная биотехническая система реализует интегрированный подход, объединяющий аппаратную регистрацию физиологических сигналов (электрокардиограммы и фотоплетизмограммы) и программную автоматизацию психологического тестирования с последующей интеллектуальной обработкой данных. Архитектура системы построена по модульному принципу и включает аппаратную подсистему регистрации биомедицинских сигналов, микропроцессорный модуль первичной обработки, интерфейс передачи данных и программную платформу анализа, визуализации и формирования аналитических отчётов.

В работе разработаны алгоритмы цифровой обработки биомедицинских сигналов, включающие многоэтапную фильтрацию, подавление артефактов, сегментацию кардиоциклов, детектирование характерных точек ЭКГ, анализ фотоплетизмограммы, вычисление параметров вариабельности

сердечного ритма, вейвлет-анализ нестационарных компонент и формирование расширенного вектора диагностических признаков. Для интеллектуальной интерпретации данных применяется ансамблевая модель классификации, обеспечивающая устойчивое распознавание психофизиологических состояний в условиях межиндивидуальной вариабельности физиологических параметров.

Результаты экспериментальной апробации подтверждают работоспособность предложенной архитектуры и практическую применимость биотехнической системы для задач профессионального отбора, аттестации персонала и функционального мониторинга в технически сложных и социально ответственных областях деятельности.

Ключевые слова: биотехническая система, психофизиологическое тестирование, электрокардиограмма, фотоплетизмограмма, вариабельность сердечного ритма, цифровая обработка сигналов, интеллектуальная диагностика.

Introduction. The current stage of scientific and technological progress is characterized by rapidly increasing levels of automation, increasing complexity of technical systems, and increasing volumes of processed information. Under these conditions, the role of the human factor in ensuring the reliability, safety, and efficiency of complex ergatic and cyber-physical systems is increasing. Despite the widespread implementation of intelligent control algorithms, final decision-making in many critical areas still rests with the human operator, necessitating constant monitoring of their functional and psycho-emotional state.

In aviation, transport, energy, telecommunications, industry, law enforcement and the military, the professional activities of personnel are associated with high responsibility, the need to quickly respond to emergency situations and process large volumes of information under time pressure [1,2]. In such conditions, decreased concentration, fatigue, emotional stress and disruption of psychophysiological adaptation mechanisms can lead to operator errors and, as a consequence, to emergency situations with severe socio-economic consequences.

In this regard, the task of objectively assessing a person’ s functional state and their ability to effectively perform professional duties under conditions of increased psycho-emotional stress is particularly relevant [3]. Traditional methods of psychological diagnostics based on questionnaires, surveys, and expert assessments have a number of limitations due to the subjectivity of self-reports, the influence of the subject’ s motivational attitudes, and social desirability effects. Furthermore, such methods do not allow for the detection of latent stress reactions manifesting at the level of the autonomic nervous system and cardiovascular regulation.

One promising area is the development of biotechnical systems that integrate a biological object and a technical device into a single system for recording, processing, and interpreting information. Such systems allow for the integration of psychological methods with hardware-based recording of physiological parameters, ensuring greater diagnostic reliability.

In recent years, instrumental methods of psychophysiological diagnostics based on the recording of objective physiological indicators reflecting the state of the body’ s regulatory systems have become increasingly widespread [4]. These indicators include electrocardiograms, photoplethysmograms, galvanic skin responses, respiratory parameters, electroencephalograms, and other biosignals. Their analysis allows us to identify signs of sympathoadrenal system activation, assess autonomic balance, and diagnose the degree of psychoemotional stress.

The electrocardiogram is of particular interest as one of the most informative and accessible biomedical signals [5-7]. Heart rate and heart rate variability parameters are widely used in medical and psychophysiological practice to assess the body’ s functional state, stress resistance, and adaptive reserves. Analysis of the temporal and spectral characteristics of the ECG allows for the acquisition of objective information on the state of

central and autonomic regulatory mechanisms.

At the same time, recording physiological parameters in isolation without considering the psychological context does not allow for a full interpretation of the observed responses. To obtain a reliable psychophysiological picture, it is necessary to correlate the body' s physiological responses with specific cognitive and emotional stimuli. In this regard, integrating psychological testing with the synchronous recording of physiological signals is a promising approach.

This integrated approach is implemented within biotechnical systems, which are complex ergatic assemblies that unite a biological object (a human) and technical means for recording, processing, and interpreting information. A biotechnical psychophysiological testing system forms a closed loop: "human - measurement system - analytical system – specialist," ensuring objective and reproducible diagnostics of functional state.

Currently, various hardware and software systems for psychophysiological diagnostics exist worldwide, including polygraph systems and functional monitoring systems [8,9]. However, most of them are focused either on lie detection or medical diagnostics and do not provide close integration with psychological testing for professional selection and personnel certification. Furthermore, many foreign solutions are expensive, require specialized maintenance, and are not always adapted to the operating conditions of departmental and corporate information systems.

In this regard, the development of domestic biotechnical psychophysiological testing systems focused on professional selection, pre-shift and pre-trip inspection, functional monitoring, and scientific research is urgent. Such systems must combine reliable hardware, flexible software, high diagnostic information yield, and ease of use.

This paper is devoted to the development of an architecture and analysis of the practical application of a biotechnical system for human psychophysiological testing, implementing an event-driven approach to the integration of psychological testing and segmented electrocardiogram recording [10]. The paper examines the principles of system construction, the organization of information flows, algorithms for digital processing of biomedical signals, and methods for intelligent data interpretation.

The aim of the study is to create a universal biotechnical platform that provides an objective assessment of the functional and psycho-emotional state of a person during the performance of psychological test tasks and is suitable for widespread implementation in applied and departmental information environments.

Materials and methods. The biotechnical system of psychophysiological testing being developed is intended for the automated conduct of psychological tests with the simultaneous recording of the physiological reactions of the subject' s body and belongs to the class of ergatic biotechnical systems and is intended to automate the procedure of psychophysiological testing with the synchronous recording of the physiological reactions of the body.

Three people participate in the testing process: 1) the test subject, 2) the BTS operator, and 3) the psychologist. Figures 1-2 show the interaction diagrams.

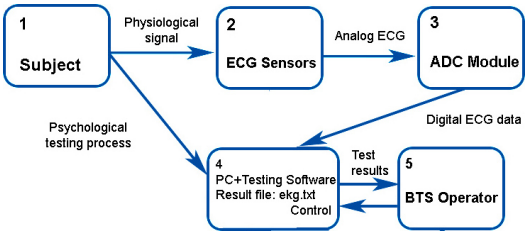


Fig.1- Scheme of interaction between the BTS operator and the subject

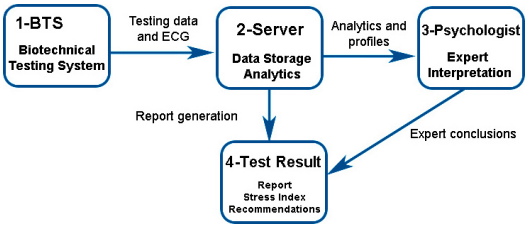


Fig.2 - Scheme of processing testing results by a psychologist

The system architecture is built on a multi-level modular principle and includes two key functional blocks:

1) a psychological testing block;

2) a block for recording, synchronizing, and writing the electrocardiogram to a results file.

In general, the system consists of the following functional levels: 1) recording of biomedical signals, 2) analog-to-digital conversion, 3) microprocessor processing, 4) data transmission and storage, and 5) intelligent analysis and visualization.

The system includes:

1) ECG and photoplethysmogram sensors;

2) analog-to-digital converter;

3) microcontroller module;

4) USB interface;

5) personal computer with analysis software platform;

6) results database and report generation module.

The integration of these blocks ensures the formation of an objective psychophysiological profile of the individual and allows for the analysis of physiological reactions to each individual stimulus (test question).

Results and discussion. The psychological testing unit automates the psychodiagnostic examination procedure and ensures standardized presentation of stimulus material, recording of the subject' s responses, and recording of the time parameters for completing tasks.

The unit performs the following main functions:

- formation of a battery of psychological tests;
- sequential presentation of questions (stimuli);
- recording the start and end of each question;
- recording the selected answer;
- measuring the reaction time of the subject;
- synchronization with the ECG recording unit.

The testing process includes the following steps:

- loading the test battery from the database;
- initializing the testing session;
- displaying instructions to the subject;
- sequential presentation of questions;
- recording responses and reaction times;
- transferring time stamps to the ECG recording unit;
- generating a psychological testing protocol.

Each test question is considered as a separate psychophysiological stimulus, to which the subject's body forms an individual physiological response.

For each question, the following information is recorded: question number q, start time t_{sq}, end time t_{eq}, reaction time t, and the selected answer option. These parameters are subsequently used to synchronize with physiological signals and generate diagnostic features.

The physiological data recording unit is designed for continuous recording of an electrocardiogram during the psychological test and the formation of a result file containing segmented ECG fragments for each question.

The ECG signal is collected from the body surface using non-invasive electrodes and fed to the analog-to-digital converter (ADC) of the microprocessor module. The following steps are performed:

- preliminary analog filtering;
- analog-to-digital conversion;
- transmission of digital readings to the software subsystem.

The software registration module ensures continuous reception of digital ECG readings and their storage in a text file of results in real time.

The results of electrocardiogram recording are saved in a text file of ekg.txt format, in which the values of the ECG signal amplitude at discrete moments in time are recorded line by line.

To ensure synchronization of physiological data with psychological stimuli, a special *separator marker is used*, inserted into the file at the end of each question.

Each fragment between two markers corresponds to one test question.

The use of segmented ECG recordings divided by test questions provides the following advantages:

- analysis of the body' s response to each stimulus;

- identification of hidden stress reactions;

- comparison of physiological parameters with specific psychological scales;

- formation of an individual psychophysiological profile;

- increased diagnostic reliability.

This approach allows us to move from an integrated assessment of a person's condition to event-oriented psychophysiological diagnostics.

One of the key features of the developed biotechnical psychophysiological testing system is the use of event-driven electrocardiogram recording during psychological testing tasks. Unlike traditional physiological monitoring methods, which analyze the subject' s holistic state throughout the entire examination session, the proposed system utilizes event-driven synchronization of physiological data with individual psychological stimuli. Each test question is considered a distinct psychophysiological event, eliciting an individual response from the body' s regulatory systems. This approach allows for a shift from an average assessment of functional status to a detailed analysis of responses to specific cognitive and emotional stimuli, significantly increasing the diagnostic sensitivity and prognostic value of the system.

Experimental testing of the developed biotechnical system for psychophysiological testing was carried out with the aim of assessing the performance of the hardware and software architecture, verifying the algorithms for processing biomedical signals, and determining the diagnostic information content of the proposed psychophysiological indicators.

The main objective of the experimental studies was to confirm the possibility of objectively recording the physiological reactions of the body during the performance of psychological test tasks, as well as to evaluate the effectiveness of the event-segmented approach to the analysis of the electrocardiogram, synchronized with individual test questions.

The experimental studies were conducted in a laboratory setting at the Educational and Scientific Center for Psychophysiological Research. Volunteers aged 18 to 30 with no diagnosed cardiovascular or neurological conditions participated in the trial.

Before testing, subjects underwent a briefing explaining the study' s objectives, the procedure, and the rules for using the system' s hardware. Each participant provided informed consent for the processing of personal and biomedical data.

The testing procedure included the following steps:

1. Registration of an individual background profile in a resting state (3–5 minutes).

2. Conducting a battery of psychological tests with synchronous ECG recording.

3. Formation of the resulting ECG file with segmentation by questions.

4. Automatic processing of physiological data.

5. Formation of a psychophysiological conclusion.

During the experiment, standard requirements of biomedical ergonomics were observed: a comfortable position for the subject, a stable room temperature, and the absence of external irritants and electromagnetic interference.

During the testing, a battery of psychological tests was used, aimed at diagnosing:

- anxiety level;

- aggressiveness of personality;

- neuropsychic stability;

- stress resistance and cognitive load.

Each test included 20 to 40 questions, presented in random order to minimize habituation. For each question, the following were recorded:

- question number;

- the moment of beginning and end;

- selected answer option;

- the reaction time of the subject.

Simultaneously with the presentation of questions, continuous ECG recording was carried out, followed by recording of data in a text file of ekg.txt format with division of segments by marker.

The processing of experimental data was carried out automatically and included the following steps:

1. Import of the resulting ECG file.

2. Signal segmentation by FFFF markers.

3. Digital filtering of each segment.

4. R-peak detection and cardiac cycle segmentation.

5. Calculation of RR intervals and heart rate variability indices.

6. Formation of a vector of psychophysiological characteristics.

7. Normalization relative to the background profile.

8. Intelligent classification of states.

9. Calculation of the integral index of psychophysiological stress.

For each test question, a set of indicators was formed that reflect the body' s physiological response to the corresponding stimulus.

The experiment yielded representative arrays of event-segmented physiological data. Analysis revealed consistent patterns of changes in cardiovascular regulation indicators depending on the emotional significance of the stimuli.

For questions related to the anxiety and aggression scales, the following were observed:

- increase in heart rate by 10-18%;

- reduction of SDNN and RMSSD values by 15-25%;

- growth of the integral energy of the cardiac signal;

- increasing the reaction time of the subject.

For neutral questions, physiological parameters remained close to background values. The application of the ensemble classification model provided the following average accuracy rates:

- Accuracy: 91- 93%

- Sensitivity: 88 - 92%

- Specificity: 94 - 97%

- F1 score: 0.88-0.91

The obtained values confirm the high stability of the algorithms and the correctness of the selected set of diagnostic features.

The results of the pilot study showed that the developed biotechnical system can detect both overt and covert psycho-emotional reactions, which are not always consciously recognized by the subjects. This confirms the diagnostic value of the instrumental approach and its advantages over traditional survey methods.

Event-segmented ECG analysis provides a detailed picture of the body' s reactions to individual psychological stimuli and allows for the formation of individual psychophysiological profiles suitable for practical use in professional selection and functional monitoring systems.

Conclusions. This paper examines the design principles, architecture, and practical application of a biotechnical system for human psychophysiological testing. This system is designed to objectively assess the functional and psychoemotional state of an individual while completing psychological testing tasks. The developed system implements an integrated biotechnical approach, combining an automated psychological testing unit and a hardware unit for recording physiological signals, followed by intelligent data processing.

The relevance of the research conducted is determined by the growing role of the human factor in ensuring the reliability and safety of modern technical and organizational systems [11-14]. Given the increasing information load, the increasing complexity of professional activities, and the increasing responsibility of personnel, traditional psychodiagnostic methods, based primarily on survey methods, do not always provide the necessary level of objectivity and predictive value. Therefore, the development of psychophysiological testing tools based on the recording of the body' s physiological reactions is an important and sought-after scientific and technical task.

A key feature of the developed biotechnical system is the event-driven organization of the testing procedure, in which each question in the psychological test is treated as an individual psychophysiological stimulus, eliciting a specific response from the body' s regulatory systems. The psychological testing unit ensures standardized presentation of stimulus material, recording of the subject' s responses and the timing of task completion, as well as the generation of a testing protocol containing data on the sequence of questions, reaction times, and selected answers.

This study developed and tested a set of algorithms for digital processing of biomedical signals, including multi-stage filtering, artifact suppression, cardiac cycle segmentation, detection of characteristic ECG points, heart rate variability analysis, and the generation of an extended vector of diagnostic features. The use of an event-based segmentation approach allows for the calculation of psychophysiological indicators separately for each test question and the comparison of physiological responses with specific psychological scales.

The study places particular emphasis on individualizing diagnostics through the use of a background profile of the subject, formed at rest. Normalizing diagnostic features relative to the individual background allows for accounting for interindividual variability in physiological parameters and ensures accurate comparison of the same individual' s responses under different conditions. This approach improves the robustness of state recognition algorithms and the reliability of diagnostic conclusions.

Experimental testing of the system confirmed the operability of the hardware and software architecture, the correctness of the implemented signal processing algorithms, and the high diagnostic value of the event-based segmentation approach. The results demonstrate the ability to detect both overt and covert psychoemotional reactions that are not always consciously recognized by subjects and not reflected in their subjective self-assessments. This confirms the fundamental advantages of the instrumental psychophysiological approach compared to traditional survey methods.

The practical significance of the developed biotechnical system lies in its potential for use in professional selection systems and periodic certification of personnel in technically complex and socially responsible fields, such as aviation, transportation, energy, industry, telecommunications, law enforcement, and the military. The mobility of the hardware and the versatility of the software allow the system to be used in both stationary laboratories and mobile settings, including pre-shift and pre-trip inspections.

The use of event-segmented ECG recording during psychological testing paves the way for the development of individual digital psychophysiological profiles of employees and the implementation of long-term monitoring systems for their functional status. Integration of the system with corporate and departmental information platforms enables the automation of data analysis, report generation, and decision support processes in the areas of human resources management and occupational safety.

Further development of the biotechnical system includes expanding the sensor suite by incorporating galvanic skin response, respiratory parameters, and accelerometry, which will improve diagnostic robustness and the accuracy of psychophysiological response interpretation. The implementation of deep learning methods for automatically generating diagnostic features and adapting classifiers to the individual characteristics of test subjects is also promising.

Thus, the developed biotechnical system for psychophysiological testing represents a modern and effective tool for objectively diagnosing a person' s functional and psychoemotional state. Event-driven integration of psychological testing and segmented ECG recording provides a fundamentally new level of detail and reliability in psychophysiological diagnostics and forms the basis for the creation of intelligent systems to ensure professional safety in the face of increasing psychoemotional and informational stress.

References

1. Chernorizov AM, Isaychev SA, Zinchenko Yu. P. Psychophysiological methods for the diagnostics of human functional states: New approaches and perspectives // Psychology in Russia: State of the Art. – 2016. - Vol.9(4).- P.23-36. DOI 10.11621/ pir.2016.0403.

2. Lohani M, Payne BR, Strayer DL. A Review of Psychophysiological Measures to Assess Cognitive States in Real-World Driving//Front Hum Neurosci. - 2019. doi 10.3389/fnhum.2019.00057.

3. Tiberio L., Cesta A., Olivetti Belardinelli M. Psychophysiological Methods to Evaluate User' s Response in Human Robot Interaction: A Review and Feasibility Study. //Robotics.- 2013. -Vol.2(2). - P.92-121. DOI 10.3390/robotics2020092.

4. Schmälzle R., Grall C. Psychophysiological Methods: Options, Uses, and Validity. // The International Encyclopedia of Media Psychology, J. Bulck (Ed.). - 2020. DOI 10.1002/9781119011071.iemp0013.

5. Li K, Rüdiger H, Ziemssen T. Spectral Analysis of Heart Rate Variability: Time Window Matters// Front Neurol.- 2019.-Vol.10. doi 10.3389/ fneur.2019.00545.

6. Estévez M., Machado C., Leisman G., Estévez-Hernández T., Arias-Morales A., Machado A., Montes-Brown J. Spectral analysis of heart rate variability //International Journal on Disability and Human Development. - 2016. -Vol.15(1). - P.5-17. DOI 10.1515/ijdhd-2014-0025.

7. Pradhan BK, Neelappu B. Ch., Sivaraman J., Kim D., Pal K. A Review on the Applications of Time-Frequency Methods in ECG Analysis// Journal of Healthcare Engineering. - 2023.-Vol.1:3145483. DOI 10.1155/2023/3145483.

8. Zyout A, Alquran H, Mustafa WA, Alqudah AM. Advanced Time-Frequency Methods for ECG Waves Recognition. Diagnostics (Basel). -2023.-Vol.1:308. doi 10.3390/diagnostics13020308.

9. Kei H., Satoshi Y., Yasuya I., Ryota Y., Ryo W., Naoki T., Noriyuki S. Time-frequency analysis of high-frequency power profile within the QRS complex in patients with ventricular tachycardia using wavelet transform //Journal of Electrocardiology. -2025.-Vol.91:154027. DOI 10.1016/j.jelectrocard.2025.154027.

10. Amekran Y., Damoun N., El H. Analysis of frequency-domain heart rate variability using absolute versus normalized values: implications and practical concerns // Frontiers in Physiology. -2024.-Vol.15:1470684. DOI 10.3389/fphys.2024.1470684.

11. Mazakova A.T., Daribayeva G.D., Amirkhanov B.S., Zholmagambetova B., Abdirazak B.K. Biotechnical system of psychophysiological diagnostics of personality conflict// Bulletin of KazUTB. - 2019. - No.4. - P.2-19.

12. Mazakova A.T., Amirkhanov B.S., Daribaeva G.D., Ziyatbekova G.Z., Abdirazak B.K. Программно-аппаратный комплекс психофизиологического тестирования// Вестник КазУТБ. -2019.-№ 1.-С-2-9

13. Mazakova A. T., Amirkhanov B.S., Mussabek G.K., Abdirazak B.K., Daribaeva G.D. Expansion of psychological test battery biotechnical psychophysiological diagnostic system // Bulletin of the Kazakh-British Technical University. -2021.-Vol.18(3).-P.51-55. DOI 10.55452/1998-6688-2021-18-3-51-55.

14. A.s. No.5499, 2019, September 26. Mazakov T.Z., Ziyatbekova G.Z., Mazakova A.T., Daribaeva G.D., Әbdirazak B.K., Amirkhanov B.S., Zholmagambetova B.R. A set of psychophysiological testing programs. Computer program.

Information about the authors

Mazakova A. T. - PhD, senior lecturer, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: aigerym97@mail.ru;

Jomartova Sh.A.- Doctor of Technical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: jomartova@mail.ru;

Mazakov T. Zh. - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University and International University of Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan, e-mail: tmazakov@mail.ru;

Zhao Baidong - Senior Lecturer, Dalian Polytechnic University, Dalian, China, e-mail: xiaoyuezhishang@vip.qq.com;

Abubakirov A. M. - 2nd year Master, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: adlett28@gmail.com.

Сведения об авторах

Мазакова А.Н. - PhD, старший преподаватель КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, e-mail: aigerym97@mail.ru;

Джомартова Ш. А. – д.т.н., профессор КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, e-mail: jomartova@mail.ru;

Мазаков Т. Ж. - д.ф.-м.н., КазНУ им. аль-Фараби, Международный инженерно-технологический университет, Алматы, Казахстан, e-mail: tmazakov@mail.ru;

Чжао Байдун - старший преподаватель, Даляньский политехнический университет, Далянь, Китай, e-mail: xiaoyuezhishang@vip.qq.com;

Абубакиров А. М. - 2 курс магистратуры, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан, e-mail: adlett28@gmail.com.

ҒТАМР 50.47.31, 67.15.35,87.53.13 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1396**

ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРДЫҢ ГРАНУЛОМЕТРИЯСЫН АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ТАЛДАУ

[1]К. Акишев, [2]Л. Акишева, [1]Ж. Нуртай

[1]К. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
[2]Назарбаев Зияткерлік мектебі, Астана, Қазақстан

Корреспондент-автор: akmail04cx@mail.ru

Зерттеудің өзектілігі құрылыс саласында пайдалану кезінде металлургиялық және энергетикалық өндірістің техногендік қалдықтарының гранулометриялық құрамын жедел және сенімді бақылау қажеттілігіне байланысты. Дәстүрлі әдістер, атап айтқанда Елек талдауы, жоғары еңбек сыйымдылығымен және жаппай және автоматтандырылған бақылау жағдайында шектеулі қолданылуымен сипатталады, бұл сандық талдау әдістерін енгізудің орындылығын анықтайды.

Жұмыста компьютерлік көру және машиналық оқыту технологияларын қолдана отырып, sem кескіндерін талдау негізінде қож және күл түйіршіктерінің гранулометриялық құрамын анықтаудың кешенді әдісі ұсынылған. Бұл әдіс 1240 кескінді алдын-ала өңдеу, U-net моделін қолдана отырып бөлшектерді сегментациялау, YOLOv5 негізіндегі объектілерді анықтау, геометриялық белгілерді алу және Random forest, xgboost және SVM Алгоритмдер ансамблін қолдана отырып фракцияларды жіктеу қадамдарын қамтиды. Нәтижелерді верификациялау алынған үлестірімдерді МЕМСТ 5459.2-20 және ASTM C136 сәйкес эталондық Елек талдауымен салыстыру арқылы орындалды.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы айқын морфологиялық гетерогенділігі бар техногендік қалдықтарды талдау үшін ”компьютерлік көру - Машиналық оқыту” гибридті архитектурасын қолдану болып табылады. Сандық нәтижелер орташа абсолютті қателік 6-7% болған кезде жіктеу дәлдігінің 95% - ға дейін жеткенін көрсетті, ал сапалық талдау күрделі пішіндегі және бөлшектердің тығыз орналасуындағы әдістің тұрақтылығын растады. Зерттеудің практикалық маңыздылығы қайталама шикізаттың сапасын бақылауды автоматтандыру және талдау уақытын қысқарту мүмкіндігі болып табылады. Әрі қарайғы зерттеулердің болашағы онлайн-түсірілімге көшумен, өндірістік желілермен интеграциялануымен және техногендік материалдардың деректер жиынтығын кеңейтумен байланысты.

Түйін сөздер: машиналық оқыту, модельдер, гранулометриялық құрам, техногендік қалдықтар, машиналық көру, алгоритм.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ГРАНУЛОМЕТРИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

[1]К. Акишев, [2]Л. Акишева, [1]Ж. Нуртай

[1]Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан,
[2]Назарбаев интеллектуальная школа, Астана, Казахстан,
e-mail: akmail04cx@mail.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оперативного и достоверного контроля гранулометрического состава техногенных отходов металлургического и энергетического производства при их использовании в строительной отрасли. Традиционные методы, в частности ситовой анализ, характеризуются высокой трудоёмкостью и ограниченной применимостью в условиях массового и автоматизированного контроля, что обуславливает целесообразность внедрения цифровых методов анализа.

В работе предложен комплексный метод определения гранулометрического состава гранул шлака и золы на основе анализа SEM-изображений с использованием технологий компьютерного зрения и машинного обучения. Метод включает этапы предварительной обработки 1240 изображений,

сегментации частиц с применением модели U-Net, детекции объектов на основе YOLOv5, извлечения геометрических признаков и классификации фракций с использованием ансамбля алгоритмов Random Forest, XGBoost и SVM. Верификация результатов выполнена путём сопоставления полученных распределений с эталонным ситовым анализом согласно ГОСТ 5459.2-20 и ASTM C136.

Научная новизна работы заключается в применении гибридной архитектуры «компьютерное зрение - машинное обучение» для анализа техногенных отходов с выраженной морфологической неоднородностью. Количественные результаты показали достижение точности классификации до 95 % при средней абсолютной ошибке 6 - 7 %, а качественный анализ подтвердил устойчивость метода при сложной форме и плотной укладке частиц. Практическая значимость исследования заключается в возможности автоматизации контроля качества вторичного сырья и сокращения времени анализа. Перспективы дальнейших исследований связаны с переходом к онлайн-съёмке, интеграцией с производственными линиями и расширением датасета техногенных материалов.

Ключевые слова: машинное обучение, модели, гранулометрический состав, техногенные отходы, машинное зрение, алгоритм.

AUTOMATED ANALYSIS OF TECHNOGENIC WASTE GRANULOMETRY

[1]K. Akishev✉, [2]L. Akisheva, [1]Zh.Nurtai

[1]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,
[2]Nazarbayev Intellectual School, Astana, Kazakhstan,
e-mail: akmail04cx@mail.ru

The relevance of the study is due to the need for prompt and reliable control of the granulometric composition of man-made waste from metallurgical and energy production when used in the construction industry. Traditional methods, in particular sieve analysis, are characterized by high labor intensity and limited applicability in conditions of mass and automated control, which makes it advisable to introduce digital analysis methods.

The paper proposes a comprehensive method for determining the granulometric composition of slag and ash granules based on the analysis of SEM images using computer vision and machine learning technologies. The method includes the stages of 1240 image preprocessing, particle segmentation using the U-Net model, YOLOv5-based object detection, geometric feature extraction, and fraction classification using an ensemble of Random Forest, XGBoost, and SVM algorithms. Verification of the results was performed by comparing the obtained distributions with the reference sieve analysis according to GOST 5459.2-20 and the ASTM C136 standard.

The scientific novelty of the work lies in the application of the hybrid architecture ”computer vision - machine learning” for the analysis of man-made waste with pronounced morphological heterogeneity. The quantitative results showed the achievement of classification accuracy of up to 95% with an average absolute error of 6 -7%, and the qualitative analysis confirmed the stability of the method in complex shapes and dense packing of particles. The practical significance of the research lies in the possibility of automating the quality control of secondary raw materials and reducing the analysis time. The prospects for further research are related to the transition to online photography, integration with production lines, and expansion of the dataset of man-made materials.

Keywords: machine learning, models, granulometric composition, man-made waste, machine vision, algorithm.

Кіріспе. Тау-кен металлургия өндірісінің техногендік қалдықтары кен материалдарын өндіру, байыту және өңдеу кезінде түзілетін қайталама ресурстардың едәуір көлемін білдіреді. Бұл қалдықтарға көбінесе мөлшері, пішіні, тығыздығы және минералды құрамы бойынша ерекшеле-

нетін ұсақ және ірі фракциялық бөлшектер жатады. Гранулометриялық құрам техногендік қалдықтарды одан әрі пайдалану мүмкіндігін айқындайтын негізгі параметрлердің бірі болып табылады: құрылыста, 3D-басып шығаруда, металлургиялық өңдеуде және өнеркәсіптің басқа да салаларында құрам үшін.

Елек талдауы және лазерлік дифракция сияқты гранулометриялық құрамды анықтаудың дәстүрлі әдістері айтарлықтай уақыт пен материалдық шығындарды, сондай-ақ үлгілерді қолмен өңдеуді қажет етеді. Деректер көлемінің ұлғаюы және бөлшектердің параметрлерін жедел және дәл бағалау қажеттілігі жағдайында заманауи цифрлық және интеллектуалды технологияларды қолдануға қызығушылық артады.

Машиналық оқыту (ML) кескіндерді, спектрлерді және басқа бөлшектердің сипаттамаларын талдауды автоматтандыруға кең мүмкіндіктер береді. Сандық микроскоптар немесе жоғары ажыратымдылықтағы камералар арқылы алынған жасанды материалдардың кескіндерін өңдеу үшін терең оқыту және компьютерлік көру әдістерін қолдану әсіресе перспективалы.

Ғылыми зерттеулердің қазіргі жағдайын талдау әртүрлі материалдардың, соның ішінде техногендік қалдықтардың гранулометриялық құрамын талдау үшін машиналық оқытуды қолдануға қызығушылықтың тұрақты өсуін көрсетті. Бұл шолу осы мәселені шешудің әртүрлі тәсілдерін жүзеге асыратын жұмыстарды қарастырады.

Соңғы жылдары Машиналық оқыту және компьютерлік көру әдістері минералды бөлшектердің гранулометриялық құрамы мен морфологиялық сипаттамаларын анықтау міндеттерінде кеңінен дамыды. Бөлшектердің үлестірілуін өлшем бойынша бағалауды автоматтандыруға сегменттеу мен детекцияның терең нейрондық модельдеріне негізделген жұмыстар айтарлықтай үлес қосты.

Бірқатар зерттеулер instance segmentation-дің бөлшектердің мөлшерін анықтаудағы тиімділігін көрсетеді. Сонымен [1] нейрондық желіні сегментациялау арқылы минералды бөлшектердің PSD есептеу әдісі ұсынылды, бұл зертханалық әдістермен салыстыруға болатын нәтижелерге қол жеткізді. Ұқсас бағытты nie және басқалар дамытады [2,3] және басқалар, мұнда терең сегменттеу модельдері (U-Net және оның модификациялары) микроскопиялық кескіндерде минералды дәндерді бөлудің жоғары дәлдігін қамтамасыз етеді. Алайда, бұл зерттеулер негізінен табиғи минералдарға және бақыланатын зертханалық жағдайларға бағытталған, бұл олардың құрылымында гетерогенділігі жоғары техногендік қалдықтарға тікелей қолданылуын шектейді.

Көп деңгейлі және ансамбльдік архитектураларды қолданатын жұмыстар жеке бағытты құрайды. Зерттеулерде [4,5] көп масштабты және ансамбльдік тәсілдер бөлшектердің күрделі морфологиясында сегменттеу тұрақтылығын арттыратыны көрсетілген. Осыған қарамастан, бұл жұмыстарда модельдердің архитектуралық аспектілеріне баса назар аударылады, статистикалық тұрақтылық, кросс-валидация және анықтамалық талдау әдістерімен салыстыру мәселелері қайталама болып қала береді.

Шолу басылымдары [6,7] минералды кескіндерді сегменттеу мәселелерінде терең оқытудың заманауи әдістерін жүйелейді және шешілмеген негізгі мәселелерді атап көрсетеді: деректер жиынтығының сипаттамаларының ашықтығы, нәтижелердің нашар түсіндірілуі және өнеркәсіптік жағдайларға бағытталған зерттеулердің шектеулі саны. Бұл тұжырымдар дәлдікті, тұрақтылықты және практикалық қолдануды біріктіретін жан-жақты зерттеулердің қажеттілігін растайды.

Онлайн бақылау мен өнеркәсіптік енгізуге бағытталған жұмыстар [8,9] зерттеулерде ұсынылған, мұнда PSD талдауының жеделдігі мен автоматтандырылуының маңыздылығы көрсетілген. Сонымен қатар, мұндай жұмыстардың көпшілігінде әртүрлі модельдерді егжей-тегжейлі салыстыру жоқ немесе нәтижелердің тұрақтылығының статистикалық негіздемесі берілмейді.

Сондай-ақ, мамандандырылған архитектуралар мен доменді бейімдеуді қолданатын зерт-

теулерді атап өткен жөн [10,11], олар әртүрлі кескін түрлері арасында модельдерді тасымалдау әлеуетін көрсетеді. Дегенмен, бұл тәсілдер айтарлықтай есептеу ресурстарын қажет етеді және әдетте жоғары мамандандырылған сценарийлерге (КТ деректері, шағылысқан жарық, SEM кескіндері) бағытталған.

Жеке топ бөлшектердің пішіні мен морфологиясын талдауға арналған жұмыстардан тұрады [12-14], сондай-ақ өнеркәсіптік қалдықтарды қайта өңдеуге байланысты зерттеулер [15]. Бұл басылымдар техногендік материалдардың сапасын бағалау кезінде деректерді статистикалық өңдеу мен инженерлік түсіндірудің маңыздылығын көрсетеді.

Терең оқыту әдістерінің кең таралуына дейін компьютерлік көруді пайдалана отырып, бөлшектердің өлшемдері мен таралуын талдауға арналған жұмыстарда суреттерге негізделген гранулометриялық құрамды анықтау әдістерінің дамуына айтарлықтай үлес қосылды. Зерттеуде [16] бөлшектерді оқшаулау әдістерін, перспективалық бұрмалануларды түзетуді және өлшемді бөлуді статистикалық өңдеуді қоса алғанда, тау жыныстарының фрагментациясын талдау үшін цифрлық кескінді өңдеудің негізгі принциптері құрылды. Бұл жұмыс image-based гранулометрия саласындағы іргелі жұмыстардың бірі ретінде қарастырылады және бүгінгі күнге дейін әдістемелік негіз ретінде қолданылады.

Image-based тәсілдерінің одан әрі дамуы [17] еңбектерінде көрінеді, онда үйінділердегі бөлшектердің көрінуін жіктеу міндеті қарастырылады және қабаттасу мен төсеу тығыздығының өлшемді бағалау дәлдігіне әсері көрсетілген. Бұл нәтижелер бөлшектердің қабаттасу геометриясы суреттерден гранулометриялық құрамды талдауда маңызды фактор болып табылатындығын және нәтижелерді түсіндіру кезінде ескерілуі керек екенін көрсетті.

Kemeny [18] өз зерттеуінде морфологиялық кескін сегментациясын қолдана отырып, темір кені түйіршіктерінің өлшемдерін өлшеуге арналған өнеркәсіптік машиналық көру жүйесін ұсынады. Авторлар өндіріс жағдайында image-based әдістерін практикалық қолдану мүмкіндігін көрсетті және алынған өлшемді бөлуді стандартты өлшеу нәтижелерімен салыстырды. Бұл бағыттың дамуы [19] және басқалардың зерттеуінде жалғасты мұнда конвейерлік желілердегі әктас материалдары үшін бөлшектердің массалық таралуын бағалау жүйесі ұсынылған, бұл өнеркәсіпте image-based гранулометриясын қолдану аясын едәуір кеңейтті.

Осылайша, дереккөздер [16-19] осы зерттеуде қолданылатын Машиналық оқыту мен нейрондық желі модельдерін қолдану тәсілдерін қоса алғанда, заманауи әдістерге негізделген гранулометриялық құрамды анықтаудың классикалық және инженерлік негізделген image-based негізін құрайды.

Осылайша, әдебиеттерді талдау қолданыстағы зерттеулер негізінен минералды бөлшектерді сегментациялауға немесе терең нейрондық желілердің архитектуралық аспектілеріне бағытталғанын көрсетеді, бұл ретте модельдерді кешенді салыстыру, статистикалық тұрақтылық және техногендік қалдықтарды талдаудың анықтамалық әдістерімен салыстыру мәселесі жеткілікті түрде ашылмаған. Бұл жұмыс осы олқылықтың орнын толтыруға бағытталған:

- техногендік қалдықтардың жаңғыртылатын деректер жиынтығын пайдалану;

- гибридті тәсілді қолдану (сегментеу/анықтау + ML-жіктеу);

- кросс-валидация мен сенімділік интервалдарын қолдана отырып модельдерді статистикалық салыстыру;

- нәтижелерді өнеркәсіптік эталон ретінде Елек талдауымен салыстыру.

Материалдар мен әдістер. *Қож және күл түйіршіктеріне арналған машиналық көру жүйесінің жұмыс кезеңдері.*

Техногендік материалдардың гранулометриялық құрамын анықтау үшін сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) әдісімен алынған қож және күл түйіршіктерінің цифрлық кескіндерін талдауға негізделген машиналық көру жүйесі пайдаланылды сур.1.



1 - сурет. Magus Микроскопы

SEM кескіндері жоғары кеңістіктік ажыратымдылықпен сипатталады және бөлшектердің нақты морфологиялық ерекшеліктерін, соның ішінде дұрыс емес пішінді, бетінің кедірбұдырын, ұсақ фракциялардың агломерациясын және өлшемдердің кең ауқымын түсіруге мүмкіндік береді, бұл оларды құрылыс мақсатындағы техногендік қалдықтарды зерттеудің өкілі етеді.

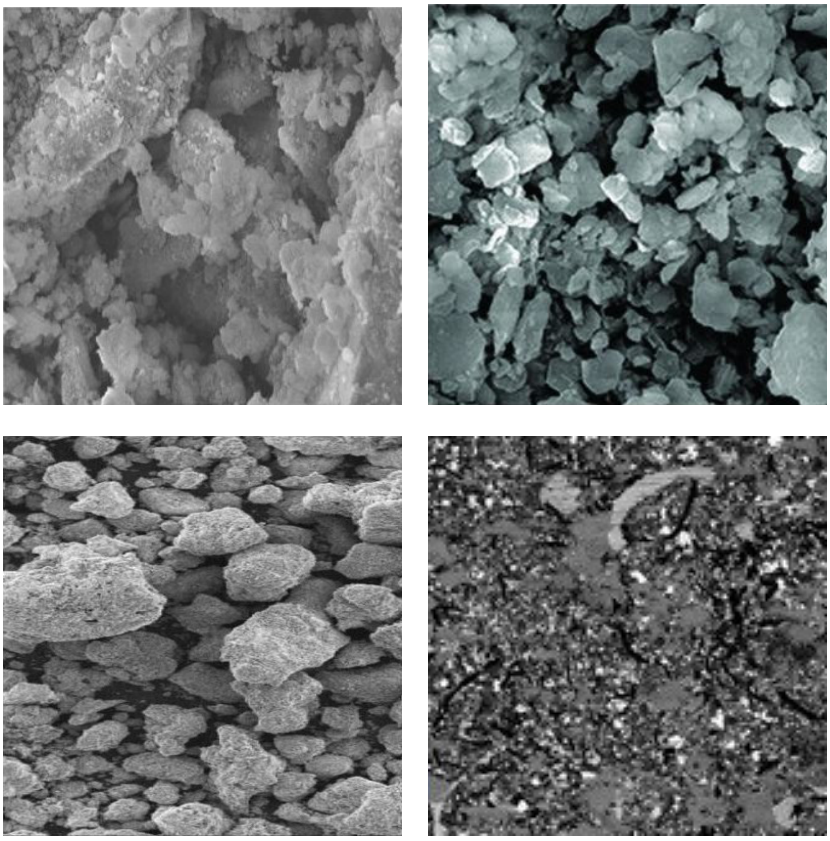
Бірінші кезеңде машиналық көру жүйесі үшін кіріс ретінде пайдаланылатын бастапқы кескіндер (2, a-сурет) жасалады. Кескіндер жарықтық пен контраст бойынша алдын-ала қалыпқа келтіріледі, бұл түсіру жағдайлары мен материалдың гетерогенділігі өзгерген кезде талдаудың тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Екінші кезеңде бөлшектерді сегментациялау жүзеге асырылады (2, b-сурет), фонда жеке түйіршіктерді оқшаулауға бағытталған. Сегменттеу контурларды, текстуралық және морфологиялық белгілерді талдау арқылы жүзеге асырылады, нәтижесінде жеке бөлшектерге сәйкес келетін пиксельдік маскалар пайда болады. Күл және қож материалдарына тән агломерацияланған аймақтарды бөлуге ерекше назар аударылады, бұл ұсақ фракцияларды дұрыс ескеруге мүмкіндік береді.

Үшінші кезең бөлшектерді анықтауды қамтиды (2-сурет, c), онда әрбір сегменттелген түйіршік жеке объект ретінде қарастырылады. Детекция кескін кеңістігіндегі бөлшектердің локализациясын қамтамасыз етеді, олардың геометриялық шекараларын анықтауға және бөлшектердің қабаттасуы мен тығыз орналасуына байланысты қателерді азайтуға мүмкіндік береді.

Соңғы кезеңде (2, d-сурет) бөлшектердің геометриялық белгілерін, оның ішінде ауданы мен эквивалентті диаметрін алу жүзеге асырылады, олардың негізінде гранулометриялық құрамның таралуы қалыптасады. Алынған мәліметтер фракцияларды жіктеу үшін қолданылады және ұсынылған әдістің верификациясы мен практикалық қолданылуын қамтамасыз ететін эталондық Елек талдауының нәтижелерімен салыстырылады.

Ұсынылған қадамдар техногендік материалдардың гранулометриялық құрамын автоматтандырылған анықтауға бағытталған SEM кескіндерін дәйекті өңдеуді көрсетеді. Сегменттеуді қолдану күрделі пішінді бөлшектерді дұрыс оқшаулауға және ұсақ фракцияларды ескеруге мүмкіндік береді, ал детекция Объектілік талдау деңгейін қамтамасыз етеді және қабаттасудың әсерін азайтады. Алынған геометриялық белгілерге сүйене отырып, бөлшектердің мөлшерін бөлу қалыптасады, ол фракцияларды жіктеу және кейіннен електен талдау нәтижелерімен салыстыру арқылы тексеру үшін қолданылады. Бұл тәсіл нәтижелердің қайталануын және құрылыс индустриясындағы токсиндер мен күлдің сапасын бақылау әдісін практикалық қолдану мүмкіндігін қамтамасыз етеді.



2 - сурет. Әртүрлі мөлшердегі шлак пен күл түйіршіктері (A-d)

Сәулет және алгоритмдерді таңдау. Суретте.3 модельдерді қосымша оқыту үшін кері байланысы бар қож және күл түйіршіктерінің гранулометриялық құрамын анықтау кезінде компьютерлік көру және машиналық оқыту алгоритмдерінің өзара әрекеттесуінің Блок-схемасы берілген.

Кезеңдер тізбегі:

- шлак пен күл түйіршіктерінің SEM суреттері;

- бөлшектердің нақты морфологиясы бар кіріс;

- алдын ала өңдеу;

- жарықтықты қалыпқа келтіру, шуды сүзу, контрастты күшейту;

- бөлшектерді сегментациялау-U-Net;

- пиксель деңгейі: жеке түйіршіктердің маскаларын қалыптастыру;

- бөлшектерді анықтау-YOLOv5;

- нысан деңгейі: bounding boxes, бөлшектерді локализациялау;

- белгілерді алу;

- ауданы, периметрі, эквивалентті диаметрі;

- фракциялардың жіктелуі-кездейсоқ Орман / XGBoost / SVM;

- өлшем аралықтары бойынша ансамбльдік жіктеу;

- гранулометриялық құрамы (PSD);

- ГОСТ (Елек талдауы) және ASTM c136 стандарттары бойынша бөлуді қалыптастыру және тексеру.

Кері байланыс алынған гранулометриялық құрамды үлестіруді эталондық Елек талдауының (ГОСТ, ASTM C136) [20,21] нәтижелерімен салыстыру арқылы жүзеге асырылады. Жүйелі ауытқулар анықталған жағдайда жіктеуіштер мен сегменттеу моделінің параметрлері нақтыланады, бұл жүйенің техногендік материалдардың өзгеретін қасиеттеріне бейімделуін қамтамасыз етеді.



3-сурет. Модельдерді оқыту үшін кері байланысы бар қож және күл түйіршіктерінің гранулометриялық құрамын анықтау кезінде компьютерлік көру және машиналық оқыту алгоритмдерінің өзара әрекеттесуінің блок-схемасы

Бөлшектерді фракциялар бойынша жіктеу үшін шешім ағаштарының әдістері мен ансамбльдік модельдерді қамтитын Машиналық оқыту алгоритмдерінің ансамблі қолданылды. Бұл алгоритмдерді таңдау олардың шуға төзімділігіне, сызықтық емес тәуелділіктермен жұмыс істеу қабілетіне және нәтижелердің түсіндірілуіне байланысты.

Ансамбльдік тәсілді қолдану жіктеудің тұрақтылығын арттыруға және техногендік материалдардың мөлшерін бөлуге тән шығарындылардың әсерін азайтуға мүмкіндік берді.

Оқу үлгісі SEM кескіндерін өңдеу нәтижесінде алынған мәліметтер негізінде қалыптасты. Әрбір бөлшек үшін үлгіге геометриялық белгілердің мәндері және эталондық Елек талдауының нәтижелері бойынша анықталған сәйкес фракциялық тиістілік енгізілді. Үлгі модельдердің сапасын дұрыс бағалауды қамтамасыз ететін оқыту, валидация және тестілік кіші үлгілерге бөлінді.

Модельдерді оқыту бекітілген параметрлерді және нәтижелердің қайталануын қамтамасыз ететін деректерді бөлудің бірыңғай схемасын қолдану арқылы жүзеге асырылды. Жіктеу сапасы стандартты көрсеткіштерді, соның ішінде дәлдікті және фракциялар бойынша орташа абсолютті қатені пайдалана отырып бағаланды.

Нәтижелерді верификациялау гранулометриялық құрамның алынған үлестірімдерін нормативтік талаптарға сәйкес орындалған эталондық Елек талдауының нәтижелерімен салыстыру арқылы жүзеге асырылды. Бұл тәсіл ұсынылған әдістің дұрыстығын және оның құрылыс индустриясының практикалық міндеттері үшін қолданылуын сандық бағалауға мүмкіндік берді.

Машиналық оқыту әдістері жеткілікті кеңістіктік ажыратымдылықпен және бөлшектердің орташа тығыздығымен кескіндерді талдауда ең жоғары тиімділікті көрсетеді. Өте ұсақ фракциялар мен айқын қабаттасуы бар кескіндер үшін жіктеу дәлдігі төмендейді, бұл ұсынылған тәсілдің қолданылу шекарасын және оны одан әрі дамыту бағытын анықтайды.

Ұсынылған тәсілде Машиналық оқыту мо-

дельдері оқшауланбайды, бірақ деректерді өңдеудің дәйекті каскады түрінде қолданылады, онда әр модель қатаң анықталған мәселені шешеді және нәтижелерді келесі кезеңге береді. Мұндай архитектура фракцияларды сегменттеу, анықтау және жіктеу міндеттерін бөлуге, жүйенің тұрақтылығын арттыруға және техногендік материалдардың гранулометриялық құрамын талдау кезінде нәтижелердің қайталануын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Эксперименттік деректер жиынтық күні 1-кестеде келтірілген.

1-кесте. Эксперименттік деректер жиынтығының сипаттамалары

Параметр	**Мағынасы**
Деректер түрі	Техногендік қалдықтардың сандық бейнелері
Суреттер саны	1240
Фракциялық сыныптардың саны	6
Фракция Диапазоны, мм	0–0,5; 0,5–1; 1–2; 2–5; 5–10; 10
Кескін пішімі	TIFF, PNG
Кескін ажыратымдылығы	5–20 Мп
Аннотация әдісі	Қолмен белгілеу (LabelMe, CVAT)
Белгілеуді тексеру	100 %
Деректерді бөлу	Train/Validation/Test = 70/15/15

1- кестеде іріктеу көлемін, фракциялық сыныптар санын, кескін пішімін, аннотация әдісін және деректерді оқыту, валидация және сынақ қосалқы үлгілеріне бөлу схемасын қоса алғанда, эксперименттік деректер жиынының негізгі параметрлері берілген. Кесте жүргізілген зерттеудің репрезентативтілігі мен қайталануын бағалауға мүмкіндік береді.

U-net байламы → YOLOv5 (компьютерлік көру)

U-net сегментациясы (пиксель деңгейі)

U-net моделі SEM кескіндеріндегі бөлшектерді сегменттеу үшін кескінді өңдеудің бірінші кезеңінде қолданылады. Оның міндеті-қож және күл түйіршіктері алып жатқан аймақтарға сәйкес келетін екілік маскаларды қалыптастыру. Кодер-декодер архитектурасы мен skip қосылыстарының арқасында U-Net ұсақ фракциялар мен агломерацияланған аймақтарды қоса алғанда, күрделі пішінді бөлшектердің шекараларын дәл бөлуді қамтамасыз етеді.

U-Net нәтижесі:

- бөлшектердің пиксельдік маскалары → анық бөлінген нысандары бар тазартылған сурет.

Бұл жағдайда u-Net фракцияларды жіктемейтінін, бірақ объектіні талдау үшін деректерді дайындайтынын түсіну керек.

YOLOv5-анықтау және бастапқы жіктеу (объект деңгейі)

Келесі қадамда сегменттелген кескіндер YOLOv5 моделіне түседі, ол жеке бөлшектерді анықтау мәселесін шешеді. YOLOv5 әр түйіршік үшін шектеу тіктөртбұрыштарын (bounding boxes) құрайды және оның кеңістіктік координаттарын анықтайды. Сонымен қатар, модель бөлшектерді Өлшем диапазоны бойынша бастапқы жіктеу үшін қолданылады, бұл деректердің Объектілік көрінісін автоматтандыруға мүмкіндік береді.

YOLOV5 нәтижесі:

- нысандар жиынтығы → координаттар, bounding boxes өлшемдері, бөлшектер идентификаторы.

Осылайша, ауысу схема бойынша жүзеге асырылады:

- пикселдер → Нысандар.

YOLOV5 байламы → кездейсоқ Орман / XGBoost / SVM (кесте деректері)

Анықталғаннан кейін әр бөлшек сандық белгілер жиынтығымен сипатталады, соның ішінде:

- ауданы, периметрі, эквивалентті диаметрі, bounding box жақтарының қатынасы.

Бұл белгілер классикалық машиналық оқыту алгоритмдері қолданатын деректердің кестелік көрінісін құрайды.

Random Forest және XGBoost алгоритмдері бөлшектерді фракциялық интервалдар бойынша түпкілікті жіктеу үшін қолданылады. Оларды қолдану шуға төзімділікке, сызықтық емес тәуелділіктермен жұмыс істеу қабілетіне және нәтижелердің жоғары интерпретациясына байланысты. Бұл модельдердің ансамбльдік сипаты техногендік материалдарға тән шығарындылардың әсерін азайтуға мүмкіндік береді.

SVM моделі жіктеу тұрақтылығы мен нәтижелердің салыстырмалылығын тексеру үшін бақылау алгоритмі ретінде қолданылады. SVM шығыстарын ансамбльдік модельдермен салыстыру шешім қабылдаудың дұрыстығын растауға және жіктеудің шекаралық жағдайларын анықтауға мүмкіндік береді.

Осылайша, ұсынылған машиналық оқыту жүйесі гранулометриялық құрамды талдауға көп деңгейлі тәсілді жүзеге асырады: U-Net бөлшектердің пиксель деңгейінде дәл сегменттелуін қамтамасыз етеді, YOLOv5 детекция мен объектіні локализациялауды жүзеге асырады, ал Random Forest, XGBoost және SVM алынған белгілерге негізделген фракцияларды жіктейді. Мұндай модульдік құрылым талдаудың дәлдігін арттыруға, нәтижелердің қайталануын қамтамасыз етуге және жүйені техногендік материалдардың әртүрлі түрлеріне бейімдеуге мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелердің дұрыстығы мен қайталануын қамтамасыз ету үшін осы зерттеу шеңберінде модельдерді оқыту параметрлерін, қолданылатын архитектуралардың ашықтығын және ұқсас деректерде эксперименттерді қайталау мүмкіндігін қамтитын верификацияның кешенді әдістемесі іске асырылды.

Біріншіден, модельдерді оқыту параметрлері эксперименттер барысында тіркелді және өзгертілмеді, бұл гиперпараметрлерді субъективті таңдаудың қорытынды нәтижелерге әсерін болдырмайды. Машиналық оқытудың барлық модельдері үшін бірдей деректерді оқыту, валидация және тестілеу үлгілеріне бөлу схемалары (70/15/15), random seed тұрақты мәндері, сондай-ақ оқуды тоқтатудың бірыңғай критерийлері қолданылды. Бұл әртүрлі модельдер арасындағы нәтижелердің салыстырмалылығын қамтамасыз етеді және дәлдік пен тұрақтылық көрсеткіштеріндегі айырмашылықтарды дұрыс түсіндіруге мүмкіндік береді.

Екіншіден, қолданылатын модельдердің архитектуралары ғылыми әдебиеттерде ашық және кеңінен сипатталған, бұл зерттеу әдіснамасының ашықтығын арттырады. Пайдаланылған нейрондық желі және ансамбльдік Алгоритмдер (U-Net, YOLO тәсілдері, Random Forest, XGBoost, SVM) жалпыға қол жетімді құрылымдар мен стандартты Машиналық оқыту кітапханалары негізінде жүзеге асырылады. Бұл басқа зерттеушілерге жеке шешімдерді немесе жабық бағдарламалық жасақтаманы қажет етпестен ұсынылған тәсілді қайталауға мүмкіндік береді.

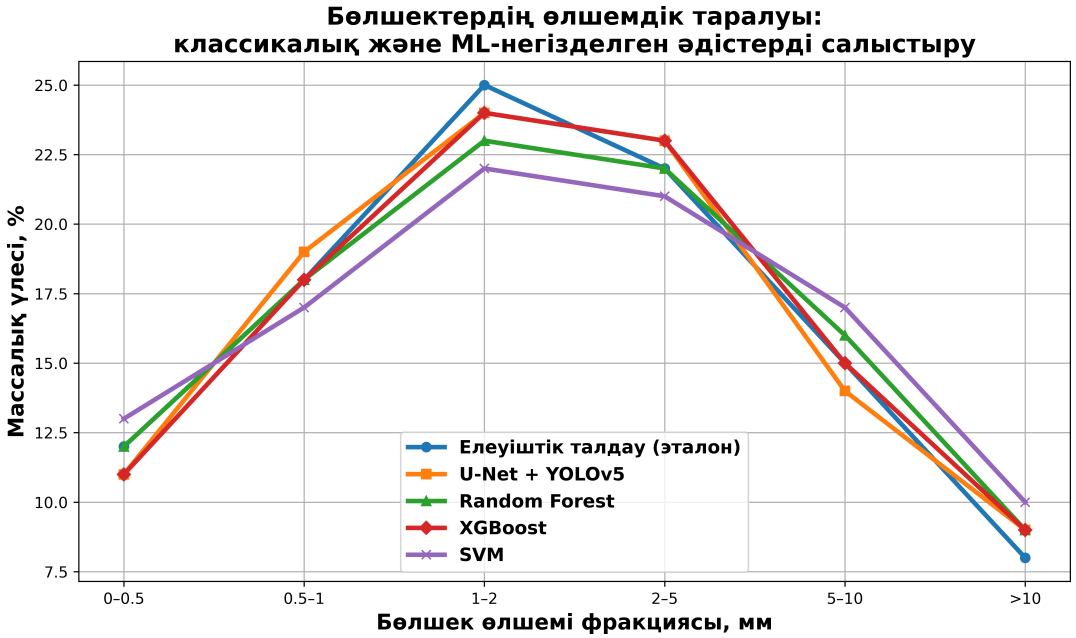
Үшіншіден, эксперименттердің қайталануы кескін сипаттамаларын, Аннотация әдістемесін, алдын ала өңдеу процедураларын және қолданылатын бағалау көрсеткіштерін қоса алғанда, кіріс деректері мен өңдеу кезеңдерін егжей-тегжейлі сипаттау арқылы қамтамасыз етіледі.5 есе кросс-валидацияны қолдану және сенімділік интервалдарын талдау алынған нәтижелердің тұрақтылығын және модельдерді қайта оқытудың жоқтығын қосымша растайды. Ұқсас деректерді пайдалану және сипатталған эксперимент шарттарын сақтау кезінде нәтижелер салыстырмалы дәлдікпен тәуелсіз зерттеулерде қайталануы мүмкін.

Осылайша, ұсынылған верификация әдісі

нәтижелердің ғылыми негізділігін, ашықтығын және қайталануын қамтамасыз етеді, бұл әдісті одан әрі дамыту және оны Құрылыс және қайта өңдеу салаларының практикасына енгізу үшін қажетті шарт болып табылады.

Нәтижелер және талқылау. Қож және күл түйіршіктерінің SEM кескіндеріне машиналық көру жүйесін қолдану нәтижелері зерттелетін материалдардың күрделі морфологиясына қарамастан бөлшектерді сегменттеу мен анықтаудың жоғары тиімділігін көрсетті. Бөлшектер дұрыс емес пішінмен, беттің кедір-бұдырымен, сондай-ақ агломерацияланған аймақтардың болуымен сипатталады, бұл дәстүрлі түрде автоматтандырылған талдауды қиындатады. Дегенмен, сегменттеу және анықтау каскадын пайдалану жеке түйіршіктерді дұрыс оқшаулауға және деректердің тұрақты Объектілік көрінісін қамтамасыз етуге мүмкіндік берді.

4-суретте классикалық Елек талдауын және нейрондық және классикалық модельдер ансамблін қоса алғанда, машиналық оқытудың әртүрлі әдістерін пайдалана отырып, алынған тау-кен металлургиялық өндірісінің техногендік қалдықтарының гранулометриялық құрамын бөлуді салыстыру ұсынылған.



4-сурет. Классикалық Елек талдауын және машиналық оқытудың әртүрлі әдістерін, соның ішінде нейрондық және классикалық модельдер ансамблін пайдалана отырып алынған техногендік қалдықтардың гранулометриялық құрамының таралуын салыстыру

Эталондық әдіс ретінде Елек талдауы қолданылды, оның нәтижелері нүктелі сызықпен белгіленді. Салыстыру үшін бір графикте U-Net + YOLOv5, Random Forest, XGBoost және SVM модельдері арқылы алынған қисықтар берілген.

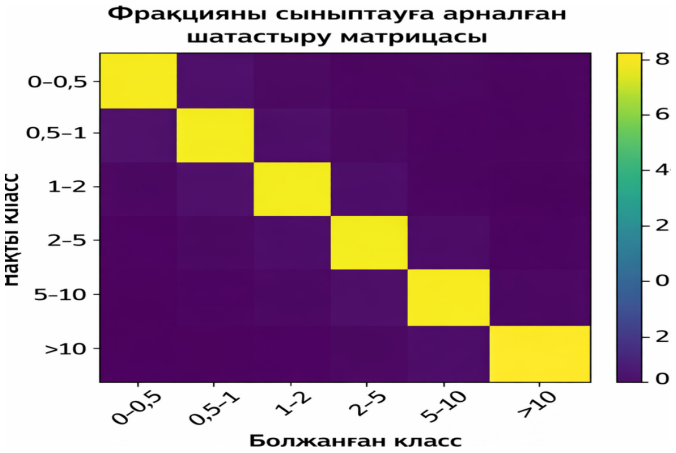
График бөлшектердің бөлшек интервалдары бойынша салынған (0-0,5; 0,5–1; 1-2; 2-5; 5-10; >10 мм), ординаттар осі бойынша әрбір фракцияның массалық үлесі пайызбен кейінге қалдырылды. Бұл көрініс бөлшектердің жеке өлшем диапазонындағы үлестірімдердің жалпы конси-стенциясын да, модельдердің жергілікті ауытқуларын да дәл бағалауға мүмкіндік береді.

Суреттен көріп отырғанымыздай, U-Net + YOLOv5 және XGBoost модельдері барлық фракциялар бойынша ең үлкен сәйкестікті көрсетеді, әсіресе 1-2 мм және 2-5 мм диапазонындағы електі талдау нәтижелерімен, олар техногендік қалдықтарды өңдеуде ең технологиялық маңызды болып табылады. Random Forest моделі жақын нәтижелерді көрсетеді, бірақ ол шағын және үлкен фракцияларда біршама үл-

кен қателіктермен сипатталады. Сонымен қатар, SVM моделі эталоннан ең үлкен ауытқуларды көрсетеді, әсіресе ұсақ бөлшектер аймағында, бұл күрделі морфологиялық белгілерді талдау кезінде сызықтық ядроның экспрессивті қабілетін шектеуге байланысты болуы мүмкін.

Осылайша, 1-сурет ансамбльдік және гибридті Машиналық оқыту әдістерін қолдану классикалық Елек талдауына айтарлықтай аз уақыт шығындарымен және процестерді автоматтандырудың жоғары деңгейімен жоғары сәйкестік дәрежесіне қол жеткізуге мүмкіндік беретінін анық растайды.

5-сурет машиналық оқытудың ансамбльдік тәсілімен алынған техногендік қалдықтардың фракцияларын жіктеудегі қателіктер матрицасын көрсетеді. Абсцисса осі бойынша модель болжаған фракциялар кластары, ординат осі бойынша – анықтамалық Елек талдауы негізінде анықталған шынайы сыныптар ұсынылған. Матрица ұяшықтарындағы мәндер әрбір бөлшек интервал үшін дұрыс және қате жіктелген бөлшектердің пайызын көрсетеді.



5-сурет. Техногендік қалдықтардың фракцияларын жіктеудегі қателіктер матрицасы

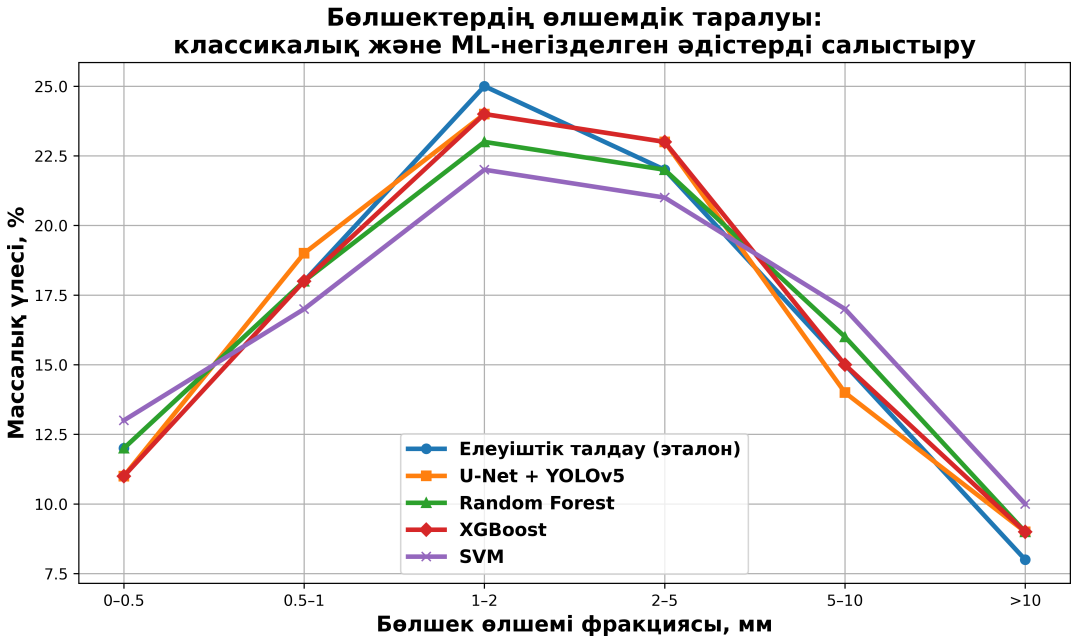
Матрицаның диагональды элементтері дұрыс жіктелген бөлшектерге сәйкес келеді және көптеген фракциялар үшін 88-94% - дан асатын жоғары мәндермен сипатталады. Бұл ұсынылған тәсілдің жоғары жіктеу дәлдігі мен тұрақтылығын көрсетеді. Қателердің ең көп концентрациясы 0,5–1 мм және 1-2 мм, сондай-ақ 2-5 мм және 5-10 мм сияқты іргелес фракциялық аралықтарда байқалады. Бұл әсер күтілетін және шекаралық өлшемдегі бөлшектердің морфологиялық жақындығына, сондай-ақ кескіндердегі бөлшектердің тығыз орналасуындағы оптикалық ажыратымдылықтың шектеулеріне байланысты.

Айта кету керек, іс жүзінде жіктеудің өрескел қателіктері жоқ, онда ұсақ фракциялардың бөлшектері қателесіп үлкендерге жіктеледі және керісінше. Бұл сегменттеу және анықтау алгоритмдерінің дұрыс жұмыс істеуін, сондай-ақ таңдалған белгі кеңістігінің кейінгі жіктеуге сәйкестігін көрсетеді.

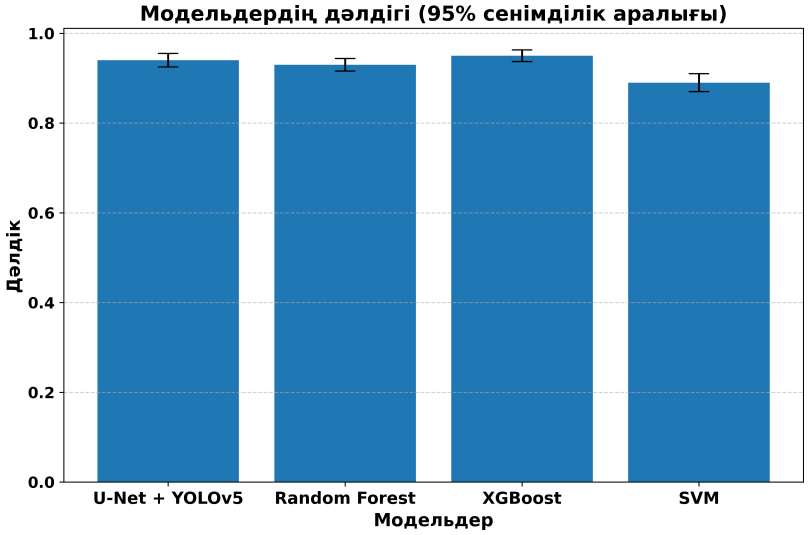
Осылайша, ұсынылған қате матрицасы қателіктердің негізгі үлесі жергілікті екенін және гранулометриялық құрамның қорытынды таралуына айтарлықтай әсер етпейтінін растайды. Бұл ұсынылған әдісті жедел бақылау және техногендік материалдарды автоматтандырылған талдау міндеттерінде практикалық қолдануға жарамды етеді.

6-суретте барлық зерттелетін машиналық оқыту үлгілері үшін Accuracy көрсеткіші бойынша 5 есе кросс-валидация нәтижелерін ұсынады: U-Net + YOLOv5, Random Forest, XGBoost және SVM. Абсцисса осі бойынша кросс-валидация қатпарларының нөмірлері, ординат осі бойынша - жіктеу дәлдігінің мәндері қойылады.

Бұл график бастапқы датасеттің әр түрлі кіші үлгілерінде оқыту кезінде әр модельдің тұрақтылығы мен қайталануын бағалауға мүмкіндік береді. Суреттен көріп отырғанымыздай, U-Net + yolov5 және XGBoost модельдері қатпарлар арасындағы дәлдік мәндерінің ең аз таралуын көрсетеді, бұл жоғары тұрақтылық пен Айқын қайта оқытудың жоқтығын көрсетеді. Random Forest моделі практикалық қолдану үшін рұқсат етілген мәндер шегінде қалып, қалыпты таралуды көрсетеді.



6 - сурет. Accuracy көрсеткіші бойынша 5 есе кросс-валидация нәтижелері



7-сурет. Машиналық оқытудың әр моделі үшін жіктеу дәлдігінің орташа мәні (Accuracy)

SVM моделі нәтижелердің ең үлкен өзгергіштігімен сипатталады, бұл берілген әдістің оқу үлгісін таңдауға сезімталдығын көрсетеді және оның техногендік қалдықтардың күрделі көп класты таралуын талдау үшін неғұрлым шектеулі қолданылуын растайды.

Осылайша, 3-суретте көрсетілген кросс-валидация нәтижелері гранулометриялық талдау тапсырмалары үшін ансамбльдік және гибридтік модельдерді қолданудың орындылығын растайды және алынған нәтижелерге қосымша статистикалық негіздеме ретінде қызмет етеді.

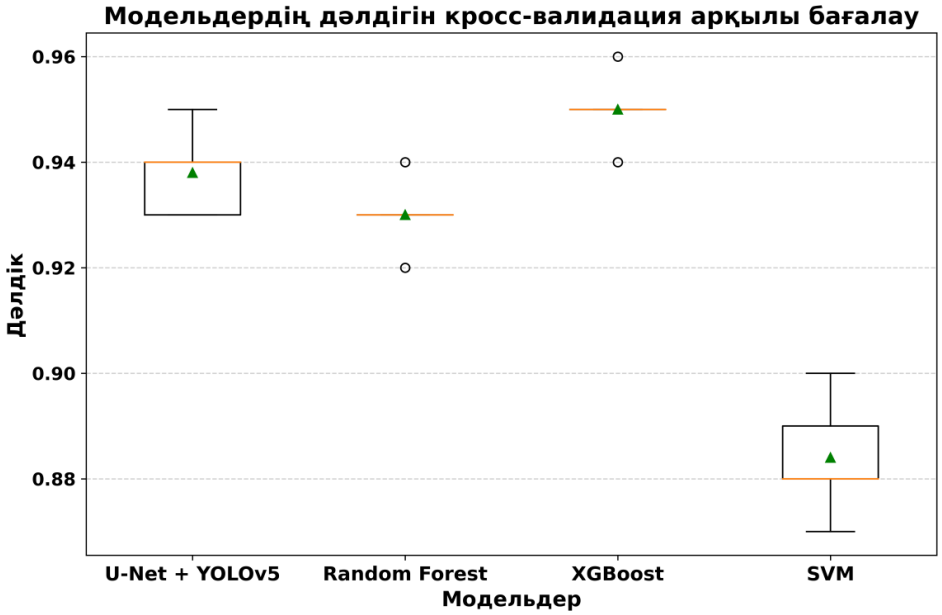
7-сурет 5 есе кросс-валидация нәтижелері бойынша есептелген 95% сенімділік аралықтарын көрсете отырып, әрбір Машиналық оқыту моделі үшін жіктеу дәлдігінің орташа мәндерін (Accuracy) көрсетеді. Сенімділік аралықтарын пайдалану алынған көрсеткіштердің статистикалық сенімділігін және нәтижелердің белгісіздік дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді.

Суреттен көріп отырғанымыздай, Accuracy-дің ең жоғары орташа мәні XGBoost моделін көрсетеді, ал сенімділік аралығы минималды енге ие, бұл нәтижелердің жоғары тұрақтылығы мен қайталануын көрсетеді. U-Net + YOLOv5 моделі сонымен қатар терең сегменттеу мен объектілерді анықтау комбинациясының тиімділігін растайтын тар сенімділік аралығымен жоғары дәлдікті көрсетеді.

Random Forest моделі оқу деректерінің вариацияларына орташа сезімталдықты көрсететін біршама кеңірек сенімділік интервалымен сипатталады. SVM моделі үшін ең төменгі орташа дәлдік және ең кең сенімділік аралығы байқалады, бұл күрделі гранулометриялық үлестірімдерді талдау кезінде берілген тәсілдің тұрақтылығының төмендігін көрсетеді.

Осылайша, 4-сурет бір классификаторлармен салыстырғанда ансамбльдік Машиналық оқыту әдістерінің артықшылықтарын статистикалық негізделген растауды қамтамасыз етеді және оларды техногендік қалдықтарды автоматтандырылған талдау міндеттерінде қолданудың орындылығын көрсетеді.

8-суретте 5 есе кросс-валидация арқылы алынған әрбір машиналық оқыту моделі үшін Accuracy мәндерін бөлудің boxplot диаграммаларын ұсынады. Визуализацияның бұл түрі медианалық мәндерді, квартильаралық диапазонды, шығарындылардың болуын және жіктеу дәлдігінің жалпы таралуын бір уақытта бағалауға мүмкіндік береді.



8 - сурет. Boxplot-әр Машиналық оқыту моделі үшін Accuracy мәндерін бөлу диаграммалары

Ұсынылған деректерден xgboost және U-Net + YOLOv5 модельдері тар квартильаралық интервалмен және медиана мен орташаның жақын мәндерімен сипатталатынын көруге болады, бұл нәтижелердің жоғары тұрақтылығын және оқу үлгісін таңдауға минималды сезімталдықты көр-

сетеді. Random Forest моделі біршама үлкен дисперсияны көрсетеді, бірақ инженерлік және өндірістік тапсырмалар үшін қолайлы мәндер шегінде қалады.

SVM моделі үшін ең кең квартильаралық диапазон, сондай-ақ Медиананың төменгі Accuracy мәндеріне ауысуы байқалады, бұл техногендік қалдықтар фракцияларының көп класты классификациясы мәселесін шешуде осы әдістің шектеулі тиімділігін растайды.

Осылайша, суретте көрсетілген boxplot талдауы 8 модельдердің сапасын кешенді статистикалық бағалауды қамтамасыз ете отырып және осы зерттеу шеңберінде ансамбльдік тәсілді таңдаудың негізділігін растай отырып, орташа мәндер мен сенімділік интервалдарының нәтижелерін толықтырады.

2-кестеде Accuracy, Recall, Precision, F1-score және орташа абсолютті қате (MAE) көрсеткіштері бойынша U-Net + Yolov5, Random Forest, XGBoost және SVM үлгілерінің салыстырмалы сәйкестігі ұсынылған. Кесте ең тиімді модельді таңдауды негіздеу үшін қолданылады.

2-кесте. Сапаның негізгі көрсеткіштері бойынша модельдерді салыстыру

Модель	Дәлдік	Қайта шақыру	Дәлдігі	F1-score	MAE, %
U-Net + YOLOv5	0,94	0,92	0,94	0,93	6,8
Random Forest	0,93	0,91	0,92	0,92	7,2
XGBoost	**0,95**	**0,93**	**0,95**	**0,94**	**6,3**
SVM	0,89	0,87	0,88	0,87	8,1

3-кесте. есе кросс-валидация нәтижелері (Дәлдік)

Fold	U-Net + YOLOv5	Random Forest	XGBoost	SVM
Fold 1	0,93	0,92	0,94	0,87
Fold 2	0,94	0,93	0,95	0,88
Fold 3	0,95	0,94	0,96	0,89
Fold 4	0,94	0,93	0,95	0,90
Fold 5	0,93	0,93	0,95	0,89
Mean	0,94	0,93	0,95	0,89
Std	0,008	0,007	0,007	0,011

4-кесте. Тұрақтылық пен есептеу шығындары бойынша әдістерді салыстыру

Критерий	U-Net + YOLOv5	Random Forest	XGBoost	SVM
Шуға төзімділік	Жоғары	Орташа	Жоғары	Төмен
Үлгіге сезімталдық	Төмен	Орташа	Төмен	Жоғары
Инференс жылдамдығы	Орташа	Жоғары	Орташа	Жоғары
Масштабтау	Жоғары	Жоғары	Жоғары	Орташа
Өнеркәсіптік енгізуге жарамдылығы	иә	иә	иә	Шектеулі

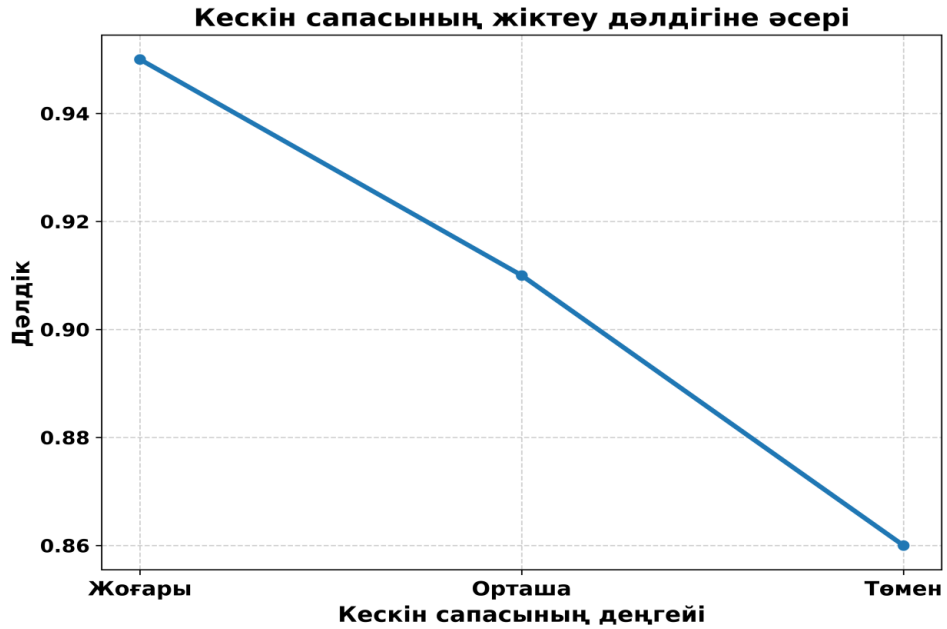
4-кестеде деректердің шуға төзімділігі, іріктеу сезімталдығы, инференция жылдамдығы және масштабталуы бойынша модельдерді сапалы салыстыру жүргізілді. Кесте өнеркәсіптік енгізу үшін модельдердің инженерлік және қолданбалы жарамдылығын көрсетеді.

3-кестеде жеке кросс-валидация қатпарларында машиналық оқытудың әрбір моделі үшін алынған жіктеу дәлдігінің (Accuracy) мәндері, сондай-ақ орташа мәндер мен стандартты ауытқулар берілген. Кесте модельдердің тұрақтылығы мен тұрақтылығын сипаттайды.

5-кестеде классикалық Елек талдауы және дәлдік, талдау уақыты, автоматтандыру деңгейі және адам факторының әсері бойынша ұсынылған ML тәсілі салыстырылады. Кесте автоматтандырылған әдістің практикалық артықшылықтарын көрсетеді.

5-кесте. Классикалық және ML тәсілдерін салыстыру

Көрсеткіш	Електі талдау	ML-тәсіл
Орташа дәлдік	Эталон	93–95%
1 үлгіні талдау белбеуі	15–20 мин	3–4 мин
Автоматизация	жок	Толық
Адам факторы	Жоғары	Минималды
Масштабтау	Шектеулі	Жоғары



9-сурет. Техногендік қалдықтар фракцияларының жіктелу дәлдігінің бастапқы кескіндердің сапасына тәуелділігі

9-сурет техногендік қалдықтар фракцияларының жіктелу дәлдігінің оқыту процесінде қолданылатын бастапқы кескіндердің сапасына және машиналық оқыту модельдерінің инференсіне тәуелділігін көрсетеді.

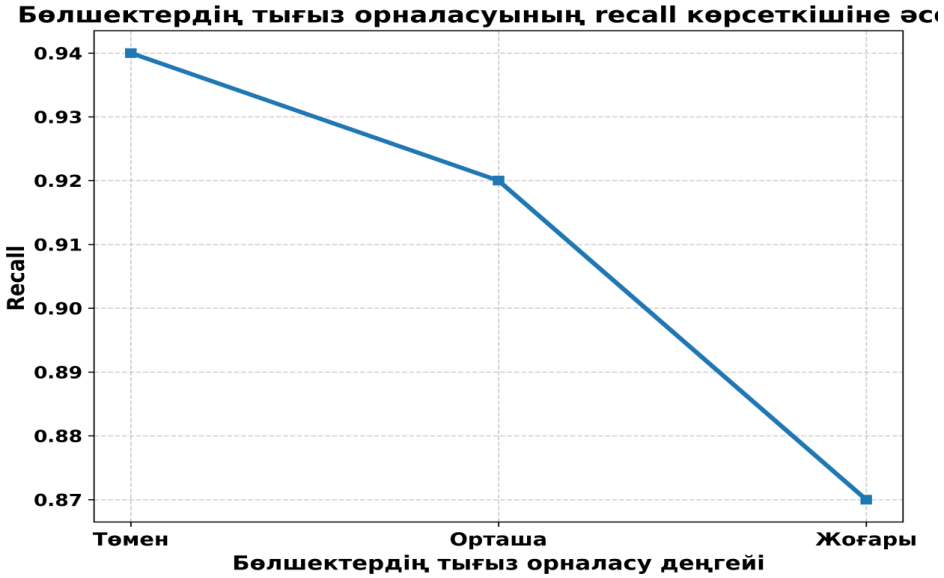
Бұл контекстегі кескіндердің сапасы кеңістіктік ажыратымдылықты, жарықтандырудың бірқелкілігін, шу деңгейін және бұлыңғырлық дәре-

жесін қамтитын параметрлер жиынтығын біл-діреді. Графикте САПАНЫҢ үш тән деңгейі көр-сетілген: жоғары, орташа және төмен, зертха-налық және өндірістік сценарийлердегі нақты түсірілім жағдайларын көрсетеді.

Суреттен көріп отырғанымыздай, суреттердің жоғары сапасымен модельдер бөлшектердің ше-караларын нақты визуализациялауға және сег-менттеу және анықтау алгоритмдерінің дұрыс жұмыс істеуіне байланысты максималды дәлдік мәндерін көрсетеді. Орташа сапаға көшу кезінде бөлшектердің контурларының ішінара жоғалуы-на және жергілікті жіктеу қателіктерінің өсуіне байланысты дәлдіктің орташа төмендеуі байқа-лады. Accuracy-тің ең маңызды құлдырауы су-реттердің сапасы төмен болған кезде жазылады, мұнда Шу мен бұлыңғырлықтың әсері фракция-ларды жіктеу кезеңіне каскадты түрде берілетін сегменттеу қателіктеріне әкеледі.

Бұл сурет суреттердің сапасы компьютерлік көру алгоритмдерінің дұрыс жұмыс істеуі үшін маңызды фактор болып табылатындығын көр-некі растау ретінде қызмет етеді. Ол ұсынылған тәсілді өнеркәсіптік енгізу кезінде суретке түсі-ру шарттарын реттеу, кескінді алдын ала өңдеу әдістерін қолдану және жабдықты калибрлеу қа-жеттілігін атап көрсетеді. Осылайша, 9-сурет әдістің негізгі шектеулерінің бірін негіздеу үшін қолданылады және көрсетілген дәлдік көрсеткі-штеріне қандай жағдайда қол жеткізілетінін көр-сетеді.

10-суретте толықтық көрсеткішінің (Recall) талданатын кескіндердегі бөлшектердің қабат-тасу тығыздығына тәуелділігі көрсетілген. Төсеу тығыздығы бөлшектердің қабаттасу дәре-жесін және олардың визуалды бөлінуінің күр-делілігін анықтайтын маңызды технологиялық параметр болып табылады. Зерттеу барысында тығыздықтың үш тән деңгейі қарастырылды: төмен, орташа және жоғары, әртүрлі үлгілерді дай-ындау сценарийлеріне сәйкес келеді.



10 - сурет. Толықтық көрсеткішінің (Recall) талданатын кескіндердегі бөлшектердің қабаттасу тығыздығына тәуелділігі

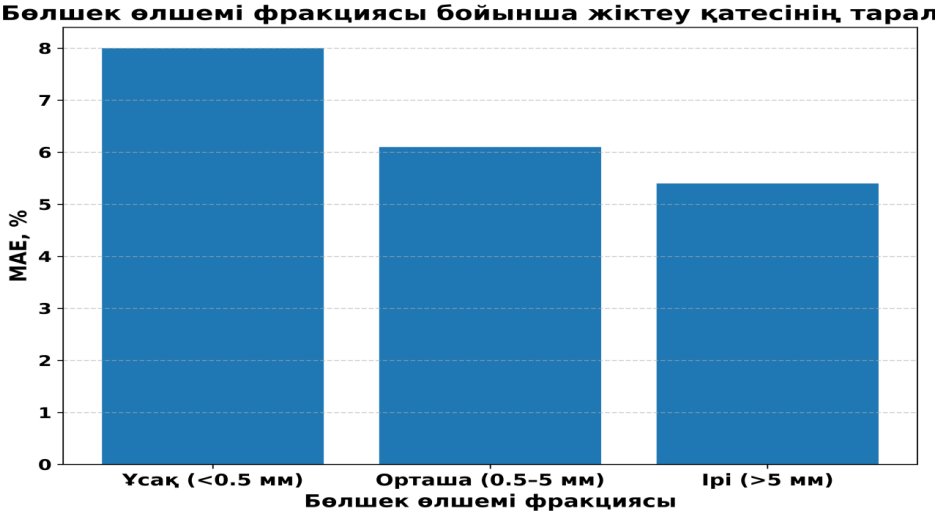
График төмен және орташа төсеу тығыздығында машиналық оқыту модельдері жоғары Recall мәндерін көрсететінін көрсетеді, бұл көптеген бөлшектердің дұрыс анықталғанын және олардың тиісті фракциялық сыныптарға жатқызылғанын көрсетеді. Төсеу тығыздығы жоғары болған кезде бөлшектердің контурларының ішінара бірігуіне және жетіспейтін объектілер санының өсуіне байланысты толықтықтың айтарлықтай төмендеуі байқалады. Бұл әсер әсіре-

се визуалды айырмашылықтар минималды болатын іргелес фракциялық Интервалдардың бөлшектері үшін айқын көрінеді.

10-сурет ұсынылған әдістің үлгіні дайындау шарттарына сезімталдығын көрсету үшін қолданылады және төсеу тығыздығы автоматтандырылған талдаудың дәлдігін шектейтін факторлардың бірі екенін растайды. Сонымен қатар, нәтижелер төсеу тығыздығы жоғары болса да, recall төмендеуі бақыланатын болып қала беретінін және соңғы гранулометриялық үлестірімнің сыни бұрмалануына әкелмейтінін көрсетеді.

Осылайша, ұсынылған график үлгілерді дайындау процедурасын стандарттау немесе ұсақ фракциялардың жоғары концентрациясы бар материалдарды талдау кезінде бөлшектерді бөлудің қосымша әдістерін қолдану қажеттілігін негіздейді.

11-сурет бөлшектердің әртүрлі өлшем диапазондары бойынша жіктеудің орташа абсолютті қателігінің (MAE) таралуын көрсетеді: ұсақ, орташа және үлкен фракциялар. Бұл график қандай фракциялық интервалдар гранулометриялық құрамды анықтаудағы жалпы қателікке үлкен үлес қосатынын бағалауға мүмкіндік береді.



11-сурет. Бөлшектердің әртүрлі өлшем диапазондары бойынша жіктеудің орташа абсолютті қателігінің таралуы (MAE): ұсақ, орташа және үлкен фракциялар

11-суреттен көрініп тұрғандай, MAE-дің ең үлкен мәндері өлшемдері қолданылатын оптикалық жүйенің ажыратымдылық шегіне жақындаған ұсақ фракцияларға тән. Мұндай бөлшектер үшін шудың, агломерацияның және пиксельді іріктеу қателіктерінің әсері артады, бұл дұрыс сегменттеу мен жіктеуді қиындатады. Орташа фракциялар үшін қате айтарлықтай төмен, бұл бөлшектердің өлшемдері мен кескін ажыратымдылығының оңтайлы қатынасына байланысты. Ірі фракциялар MAE минималды мәндерімен сипатталады, өйткені олардың контурлары айқын және компьютерлік көру алгоритмдерімен оңай анықталады.

Бұл сурет өте кішкентай фракцияларды талдау кезінде әдісті шектеуді сандық негіздеу үшін қолданылады және ML тәсілі мен классикалық Елек талдауы арасындағы негізгі сәйкессіздіктер жергілікті екенін растайды. Сонымен қатар, кішігірім фракциялар үшін қателіктердің жоғарылауы гранулометриялық құрамның интегралды таралуына айтарлықтай әсер етпейтінін және әдістің практикалық құндылығын төмендетпейтінін атап өткен жөн.

11-сурет сонымен қатар жоғары ажыратымдылықты түсіру әдістері мен бейімделген сегменттеу алгоритмдерін қолдану арқылы ұсақ бөлшектерді талдаудың дәлдігін арттыруға бағытталған әрі қарайғы зерттеу бағыттарын анықтауға негіз болады.

6-кесте тау-кен металлургия өндірісінің техногендік қалдықтарының гранулометриялық құрамын анықтау үшін қолданылатын машиналық оқытудың зерттелетін модельдерінің қорытынды рейтингін ұсынады. Рейтинг жіктеу дәлдігін (Accuracy), толықтығын (Recall), фракцияларды анықтаудағы орташа абсолютті қатені (MAE), кросс-валидация нәтижелерінің тұрақтылығын, кіріс деректерінің шуға сезімталдығын, есептеу шығындарын және өнеркәсіптік жағдайларда ықтимал қолдануды қоса алғанда, сандық және сапалық көрсеткіштерді кешенді талдау негізінде орындалады.

6-кесте. Модельдердің қорытынды рейтингі

Ранг	Модель	Негіздеме
1	**XGBoost**	Ең жақсы дәлдік, минималды қателік, жоғары тұрақтылық
2	U-Net + YOLOv5	Дәл сегменттеу және анықтау, тұрақтылық
3	Random Forest	Жақсы жалпылау, қарапайымдылық
4	SVM	Күрделі фракциялар үшін шектеулі тиімділік

Соңғы рейтингте ең жоғары Accuracy және F1-score мәндерін, MAE минималды мәнін және 5 есе кросс-валидациядағы нәтижелердің ең аз таралуын көрсеткен XGBoost моделі маңызды орын алады. Тар сенімділік аралықтары мен көрсеткіштердің тұрақтылығы осы модельдің жоғары жалпылау қабілетін көрсетеді, бұл бөлшектердің өзгермелі морфологиясы бар гетерогенді техногендік материалдарды талдауда өте маңызды.

Екінші орынды u-net + yolov5 гибридті тәсілі алады, ол кескіндердегі бөлшектерді сегменттеу мен анықтаудың жоғары дәлдігін қамтамасыз етеді. Бұл модель негізгі көрсеткіштер бойынша XGBoost-пен салыстыруға болатын нәтижелерді көрсетті, бірақ ол біршама жоғары есептеу шығындарымен сипатталады, бұл оны шектеулі өндірістік желілер жағдайында қолдануды шектейді.

Үшінші орында тұрған Random Forest моделі қалыпты есептеу талаптарында жақсы тұрақтылық пен салыстырмалы түрде жоғары дәлдікті көрсетеді. Дегенмен, оның күрделі сызықтық емес тәуелділіктерді модельдеу қабілеті қатенің біршама жоғары мәндерінде көрінетін күшейту алгоритмдерінен төмен.

Рейтингте төртінші орынды SVM моделі алады, ол ең төменгі Accuracy мәндерін және нәтижелердің ең үлкен таралуын көрсетті. Бұл күрделі техногендік қалдықтарды гранулометриялық талдаудың көп класты мәселелерін шешуде осы әдістің шектеулі тиімділігін көрсетеді.

Алынған нәтижелер техногендік қалдықтардың гранулометриялық құрамын автоматтандырылған анықтау үшін машиналық оқыту әдістерін қолданудың тиімділігін растайды, алайда ұсынылған тәсілдің одан әрі дамуы өнеркәсіптік өндіріс жағдайында оның практикалық қолданылуын кеңейтуге бағытталған бірқатар перспективалық бағыттармен байланысты.

Әрі қарай зерттеудің негізгі бағыттарының бірі-офлайн талдаудан онлайн түсірілімге көшу. Өнеркәсіптік камераларды пайдалана отырып, суреттерді ағынмен алуды іске асыру қайта өңдеу процесінде материалдардың түйіршіктелген құрамын үздіксіз мониторингтеуге мүмкіндік береді. Бұл тұрғыда түсірілімді материалдың қозғалысымен синхрондау, діріл мен біркелкі емес жарықтандырудың орнын толтыру, сондай-ақ сегменттеу және анықтау алгоритмдерін динамикалық өзгеретін түсіру жағдайларына бейімдеу өзекті міндеттер болып табылады.

Екінші маңызды бағыт әзірленген әдісті Құрылыс және тау-кен металлургия салалары кәсіпорындарының өндірістік желілерімен интеграциялау болып табылады. Технологиялық

процестерді басқару контурына Машиналық оқыту алгоритмдерін енгізу гранулометриялық құрамның ағымдағы сипаттамалары негізінде Шикізатты ұсақтау, сұрыптау және мөлшерлеу режимдерін жедел түзету мүмкіндіктерін ашады. Ол автоматтандыру жүйелерімен (SCADA, MES) өзара әрекеттесу интерфейстерін әзірлеуді, сондай-ақ модельдердің нақты уақыт режимінде тұрақты жұмыс істеуін қамтамасыз етуді талап етеді.

Үшінші перспективалық бағыт металлургиялық қождар, күл-қож материалдары, байыту қалдықтары және құрылыс бөлшектеу қалдықтары сияқты техногендік қалдықтардың әртүрлі түрлерін қосу арқылы датасеттің кеңеюі мен әртараптандырылуына байланысты. Деректердің көлемі мен әртүрлілігін арттыру модельдердің жалпылау қабілетін арттыруға, жеке материалдардың ерекшеліктеріне сезімталдықты төмендетуге және әртүрлі кәсіпорындар мен технологиялық схемалар арасындағы әдістің тасымалдануын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Аталған бағыттарды іске асыру қайталама шикізат сапасын бақылаудың зияткерлік жүйелерін қалыптастыру үшін алғышарттар жасайды және құрылыс саласында цифрлық технологиялардың одан әрі дамуына ықпал етеді.

Қорытынды. Зерттеу барысында кескінді алдын-ала өңдеудің, U-net моделін қолдана отырып бөлшектерді сегментациялаудың, yolov5 негізіндегі объектілерді анықтаудың, геометриялық белгілерді алудың және машиналық оқыту алгоритмдерінің ансамблін (Random Forest, XGBoost және SVM) қолдана отырып фракцияларды жіктеудің дәйекті кезеңдерін қамтитын қож және күл түйіршіктерінің SEM кескіндерін талдауға негізделген кешенді әдіс ұсынылды). Нәтижелердің дұрыстығы мен қайталануын қамтамасыз ету үшін 5 есе кросс-валидацияны, сенімділік интервалдарын талдауды және алынған үлестірімдерді МЕМСТ 5954.2-2020 және ASTM c136 стандарты бойынша эталондық Елек талдауының нәтижелерімен салыстыруды қамтитын верификация рәсімі іске асырылды.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы - ”компьютерлік көру-Машиналық оқыту” гибридті архитектурасын техногендік қалдықтардың гранулометриялық құрамын анықтау міндетіне қолдану, сондай-ақ тұрақтылықты, қайталануды және инженерлік қолдануды ескере отырып, әртүрлі модельдерді кешенді статистикалық салыстыру. Зертханалық үлгілер мен табиғи минералдарға бағытталған көптеген зерттеулерден айырмашылығы, ұсынылған тәсіл жоғары морфологиялық гетерогенділік пен бөлшектердің агломерациясы бар материалдарға бейімделген.

Сандық нәтижелер дәлдіктің ең жақсы көрсеткіштерін XGBoost моделі (95% дейін Accuracy, MAE шамамен 6-7%) көрсететінін көрсетті, u-net + yolov5 гибридті тәсілі бөлшектерді сегменттеу мен анықтаудың жоғары дұрыстығын қамтамасыз етеді. Қате матрицалары мен кросс-валидация нәтижелерін талдау ансамбльдік модельдердің тұрақтылығын және жіктеудің өрескел қателіктерінің жоқтығын растады. Сапалық талдау кескін сапасына, бөлшектердің жиналу тығыздығына және өте ұсақ фракцияларды талдауға байланысты әдістің негізгі шектеулерін анықтады, бірақ бұл шектеулер интегралды гранулометриялық үлестірудің айтарлықтай бұрмалануына әкелмейтінін көрсетті.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы құрылыс саласында пайдалану кезінде техногендік қалдықтардың гранулометриялық құрамын жедел және автоматтандырылған бақылау үшін ұсынылған әдісті қолдану мүмкіндігі болып табылады. Бұл тәсілді іске асыру талдау уақытын бірнеше есе қысқартуға, адам факторының әсерін барынша азайтуға және Шикізат сапасын бақылаудың ауқымдылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Әрі қарайғы зерттеулердің болашағы онлайн Түсірілім мен ағынды кескінді өңдеуге көшумен, дамыған алгоритмдерді өндірістік желілермен және автоматтандыру жүйелерімен біріктірумен және техногендік қалдықтардың әртүрлі түрлерімен датасетті кеңейтумен байланысты. Аталған бағыттарды іске асыру қайталама материалдардың сапасын басқарудың Зияткерлік жүйелерін қалыптастыру үшін негіз жасайды және құрылыс және қайта өңдеу өнеркәсібінде цифрлық технологиялардың дамуына ықпал ете-

ді.

Техногендік қалдықтардың гранулометриялық құрамын автоматтандырылған түрде анықтаудың ұсынылған әдісін енгізу зертханалық бақылауға кететін шығындарды қысқарту, технологиялық шешімдер қабылдаудың жеделдігін арттыру және Шикізат шығынын азайту есебінен айқын экономикалық әсерді қамтамасыз етеді. Айтарлықтай еңбек және уақыт ресурстарын қажет ететін дәстүрлі елеуіш талдауларымен салыстырғанда, машиналық көру және машиналық оқыту әдістерін қолдану талдау ұзақтығын 3-5 есе қысқартуға мүмкіндік береді, бұл әсіресе материалдарды ағынмен өңдеу кезінде маңызды.

Қолмен жұмыс істеу үлесінің төмендеуі және оператордың субъективті факторын алып тастау зертханалардың пайдалану шығындарының төмендеуіне және нәтижелердің қайталануының жоғарылауына әкеледі. Гранулометриялық құрамды автоматтандырылған талдау шикізаттың фракциялық құрамын дәлірек бақылауға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде құрылыс қоспаларын өндіруде тұтқыр компоненттер мен түзету қоспаларының артық шығынын азайтады. Дәл PSD деректеріне негізделген формулаларды оңтайландыру материалдың түріне және өндіріс технологиясына байланысты шикізат ресурстарын 5-10% үнемдеуге мүмкіндік береді деп есептеледі.

Қаржыландыру. *Мақалада сипатталған зерттеу ”AG TECH” ЖШС қаржыландыратын ”Тау-кен металлургия өндірісінің барлық кезеңдеріндегі өнім сапасын басқару жүйесінің цифрлық қосарлануы” бастамалық жобасы аясында жүргізілді.*

Әдебиеттер

1. Baraian A., et al. Computing Particle Size Distribution of Mineral Rocks using Deep Learning-based Instance Segmentation// 2022 10th European Workshop on Visual Information Processing (EUVIP). -2022. -P. 1-6. DOI 10.1109/EUVIP53989.2022.9922748.

2. Nie H., et al. Image Segmentation Method on Quartz Particle-Size Detection by Deep Learning Network// Minerals. -2023. -Vol.12(12):1479. DOI 10.3390/min12121479.

3. Latif A., et al. Deep-Learning-Based Automatic Mineral Grain Segmentation and Recognition// Minerals. -2022. -Vol.12(4):455. DOI 10.3390/min12040455.

4. Neubauer T., et al. Multiscale attention-based instance segmentation for measuring crystals with large size variation // Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV). -2024. -arXiv:2401.0339. DOI 10.1109/TIM.2023.3345916.

5. Jiang J., et al. Res-UNet Ensemble Learning for Semantic Segmentation of Mineral Optical Microscopy Images //Minerals. -2024. -Vol.14(12):1281. DOI 10.3390/min14121281.

6. Zhou X., He Y. Deep Ensemble Learning-Based Sensor for Flotation Froth Image Recognition// Sensors. -2024. -Vol. 24(15):5048. DOI 10.3390/s24155048.

7. Liu Y., et al. Deep learning in image segmentation for mineral production: A review// Computers & Geosciences. -2023. -Vol. 180:105455. DOI 10.1016/j.cageo.2023.105455.

8. Luo G. Online detection system for ore PSD based on deep learning// Journal of Computer, Signal, and System Research. - 2025. -Vol.2(3). - P.1- 16. DOI 10.71222/r6qws842.

9. Tae Soo E., et al. Development and application of a user-friendly general-purpose predictive simulation tool for two-dimensional flow analysis//Environmental Modelling & Software. -2023. -Vol.163:105665. DOI 10.1016/j.envsoft.2023.105665.

10. Gotkowski K., et al. ParticleSeg3D: A Scalable Out-of-the-Box Deep Learning Segmentation Solution for Individual Particle Characterization from Micro CT Images in Mineral Processing and Recycling// Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV). -2023.DOI 10.48550/arXiv.2301.13319.

11. Martins L., et al. Deep Learning Domain Adaptation for Minerals Semantic Segmentation in Reflected Light microscopy images// Preprints. -2024.- P.2-28. DOI 10.20944/preprints202412.0572.v1.

12. Qiu Y., et al. Minima-YOLO: A Lightweight Identification Method for Lithium Mineral Components Under a Microscope Based on YOLOv8// Sensors. -2025. –Vol.25(7):2048. DOI 10.3390/s25072048.

13. Yimin L., et al. Flow characterization of compressible biomass particles using multiscale experiments and a hypoplastic model// Powder Technology. -2021.-Vol.383. -P.396-409. DOI 10.1016/j.powtec.2021.01.027.

14. Kim B., et al. Multi-scale flume investigation of the influence of cylindrical baffles on the mobility of landslide debris//Engineering Geology. - 2023.-Vol.314:107012. DOI 10.1016/j.enggeo.2023.107012.

15. Акишев К., Арынгазин К.Ш., Карпов В.И. Применение методов кластерного анализа для статистической оценки качества металлургического шлака Павлодарского филиала ТОО «Кастинг»//Проблемы автоматики и управления. -2019. -№ 2. - С.79-87.

16. Matthew J., et al. An industrial 3D vision system for size measurement of iron ore green pellets using morphological image segmentation// Minerals Engineering. -2008. -Vol.21(5). -P.405-415. DOI 10.1016/j.mineng.2007.10.020.

17. Andersson T., et al. A machine vision system for estimation of size distributions by weight of limestone particles//Minerals Engineering.-2012.-Vol.25(1).-P.38-46. DOI 10.1016/j.mineng.2011.10.001.

18. Kemeny J. M., Devgan A., Hagaman R. M., Wu X. Analysis of Rock Fragmentation Using Digital Image Processing //Journal of Geotechnical Engineering (ASCE). -1993. - Vol.119(7). -P.1144-1160. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:7(1144).

19. Andersson T., Thurley M. J. Visibility Classification of Rocks in Piles//IEEE Computer Societ. -2008. -P.207–213. DOI 10.1109/DICTA.2008.85.

20. ГОСТ 5954.2-2020. Ситовый анализ класса крупности не менее 20 мм. //Стандартинформ. -2020. - 11с.

21. ASTM C136 // C136M -19. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates//Book of standarts. -2025. -Vol.04.02. DOI 10.1520/C0136_C0136M-19.

References

1. Baraian A., et al. Computing Particle Size Distribution of Mineral Rocks using Deep Learning-based Instance Segmentation// 2022 10th European Workshop on Visual Information Processing (EUVIP). -2022. -P. 1-6. DOI 10.1109/EUVIP53989.2022.9922748.

2. Nie H., et al. Image Segmentation Method on Quartz Particle-Size Detection by Deep Learning Network// Minerals. -2023. -Vol.12(12):1479. DOI 10.3390/min12121479.

3. Latif A., et al. Deep-Learning-Based Automatic Mineral Grain Segmentation and Recognition// Minerals. -2022. -Vol.12(4):455. DOI 10.3390/min12040455.

4. Neubauer T., et al. Multiscale attention-based instance segmentation for measuring crystals with large size variation // Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV). -2024. -arXiv:2401.0339. DOI 10.1109/TIM.2023.3345916.

5. Jiang J., et al. Res-UNet Ensemble Learning for Semantic Segmentation of Mineral Optical Microscopy Images //Minerals. -2024. -Vol.14(12):1281. DOI 10.3390/min14121281.

6. Zhou X., He Y. Deep Ensemble Learning-Based Sensor for Flotation Froth Image Recognition// Sensors. -2024. -Vol. 24(15):5048. DOI 10.3390/s24155048.

7. Liu Y., et al. Deep learning in image segmentation for mineral production: A review// Computers & Geosciences. -2023. -Vol. 180:105455. DOI 10.1016/j.cageo.2023.105455.

8. Luo G. Online detection system for ore PSD based on deep learning// Journal of Computer, Signal, and System Research. - 2025. -Vol.2(3). - P.1- 16. DOI 10.71222/r6qws842.

9. Tae Soo E., et al. Development and application of a user-friendly general-purpose predictive simulation tool for two-dimensional flow analysis//Environmental Modelling & Software. -2023. -Vol.163:105665. DOI 10.1016/j.envsoft.2023.105665.

10. Gotkowski K., et al. ParticleSeg3D: A Scalable Out-of-the-Box Deep Learning Segmentation Solution for Individual Particle Characterization from Micro CT Images in Mineral Processing and Recycling// Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV). -2023.DOI 10.48550/arXiv.2301.13319.

11. Martins L., et al. Deep Learning Domain Adaptation for Minerals Semantic Segmentation in Reflected Light microscopy images// Preprints. -2024.- P.2-28. DOI 10.20944/preprints202412.0572.v1.

12. Qiu Y., et al. Minima-YOLO: A Lightweight Identification Method for Lithium Mineral Components Under a Microscope Based on YOLOv8// Sensors. -2025. –Vol.25(7):2048. DOI 10.3390/s25072048.

13. Yimin L., et al. Flow characterization of compressible biomass particles using multiscale experiments and a hypoplastic model// Powder Technology. -2021.-Vol.383. -P.396-409. DOI 10.1016/j.powtec.2021.01.027.

14. Kim B., et al. Multi-scale flume investigation of the influence of cylindrical baffles on the mobility of landslide debris//Engineering Geology. - 2023.-Vol.314:107012. DOI 10.1016/j.enggeo.2023.107012.

15. Akishev K., Aryngazin K.Sh., Karpov V.I. Primenenie metodov klasternogo analiza dlja statisticheskoj ocenki kachestva metallurgicheskogo shlaka Pavlodarskogo filiala TOO «Kasting»//Problemy avtomatiki i upravlenija. -2019.-№ 2. - S.79-87 [in Russian].

16. Matthew J., et al. An industrial 3D vision system for size measurement of iron ore green pellets using morphological image segmentation// Minerals Engineering. -2008. -Vol.21(5). -P.405-415. DOI 10.1016/j.mineng.2007.10.020.

17. Andersson T., et al. A machine vision system for estimation of size distributions by weight of limestone particles//Minerals Engineering.-2012.-Vol.25(1).-P.38-46. DOI 10.1016/j.mineng.2011.10.001.

18. Kemeny J. M., Devgan A., Hagaman R. M., Wu X. Analysis of Rock Fragmentation Using Digital Image Processing //Journal of Geotechnical Engineering (ASCE). -1993. - Vol.119(7). -P.1144-1160. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:7(1144).

19. Andersson T., Thurley M. J. Visibility Classification of Rocks in Piles//IEEE Computer Societ. -2008. -P.207–213. DOI 10.1109/DICTA.2008.85.

20. GOST 5954.2-2020. Sitovyj analiz klassa krupnosti ne menee 20 mm. //Standartinform. -2020. -11s. [in Russian]

21. ASTM C136 // C136M -19. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates//Book of standarts. -2025. -Vol.04.02. DOI 10.1520/C0136_C0136M-19.

Авторлар туралы мәлімет

Акишев К.М. - т. ғ. к., қауымдастырылған профессор (доцент), Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: akmail04cx@mail.ru;

Акишева Л. - Назарбаев зияткерлік мектебі, Астана, Қазақстан, e-mail: L.Ak@mail.ru;

Нұртай Ж.Т. - PhD докторы, асс. профессор, Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: zhadira_nurtai@mail.ru.

Information about the authors

Akishev K. M. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (Associate Professor), K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,e-mail:akmail04cx@mail.ru;

Akisheva L.- Nazarbayev Intellectual School, Astana, Kazakhstan, e-mail: L. Ak@mail.ru;

Nurtai Zh.T. - PhD, Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhadira_nurtai@mail.ru.

МРНТИ 20.51.19, 47.13.07 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1270**

МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ ИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИИ В СРЕДЕ PYTHON

Б. Рысбекқызы

Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, Караганда,Казахстан

Корреспондент-автор: bakhytgulz@mail.ru

Качественная обработка сигнала электрокардиограммы (ЭКГ) является актуальной проблемой в современной диагностике для выявления опасных признаков сердечно-сосудистых заболеваний и аритмий у пациентов. Используемые методики и программы для анализа и классификации сигнала работают с массивами точек для математического моделирования, которые необходимо извлечь из изображения или записи электрокардиографа. Целью этой работы являлось разработать методику извлечения изображений ЭКГ сигналов в одномерный массив. Предложен алгоритм, основанный на последовательном проведении операций обработки цвета и улучшении качества изображений, наложения маски и построение одномерного массива точек с использованием инструментов и библиотек Python с открытым доступом. Результаты тестирования образцов из базы данных MIT/BIH и сравнение изображений до и после обработки показали, что точность извлечения сигнала составляет приблизительно 95%. Кроме того, представленный дизайн приложения отличается простотой и доступностью в использовании. Предложенная программа для анализа и обработки данных ЭКГ имеет большой потенциал в будущем для разработки более сложных программных приложений с целью автоматического анализа данных и определения аритмий или других патологий.

Ключевые слова: сигнал ЭКГ, MIT/BIH, Python, обработка изображений, одномерный массив, OpenCV, Matplotlib, NumPy.

ELECTRONIC SIGNALS AND IMAGES IN THE PYTHON ENVIRONMENT

B. Rysbekkyzy

Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
e-mail: bakhytgulz@mail.ru

High-quality signal processing of an electrocardiogram (ECG) is an urgent problem in present day diagnostics for revealing dangerous signs of cardiovascular diseases and arrhythmias in patients. The used methods and programs of signal analysis and classification work with the arrays of points for mathematical modeling that must be extracted from an image or recording of an electrocardiogram. The aim of this work is developing a method of extracting images of ECG signals into a one-dimensional array. An algorithm is proposed based on sequential color processing operations and improving the image quality, masking and building a one-dimensional array of points using Python tools and libraries with open access. The results of testing samples from the MIT/BIH database and comparing images before and after processing show that the signal extraction accuracy is approximately 95 %. In addition, the presented application design is simple and easy to use. The proposed program for analyzing and processing the ECG data has a great potential in the future for the development of more complex software applications for automatic analyzing the data and determining arrhythmias or other pathologies.

Keywords: ECG signal, MIT/BIH, Python, image processing, one-dimensional array, OpenCV, Matplotlib, NumPy.

PYTHON ОРТАСЫНДАҒЫ ЭЛЕКТРОНДЫҚ СИГНАЛДАР МЕН БЕЙНЕЛЕРДЕН ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММАЛАРДЫ АЛУ ӘДІСТЕРІ

Б. Рысбекқызы

Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан,
e-mail: bakhytgulz@mail.ru

Электрокардиограмма сигналын (ЭКГ) сапалы өңдеу пациенттердегі жүрек-қан тамырлары аурулары мен аритмияның қауіпті белгілерін анықтау үшін қазіргі диагностикадағы өзекті мәселе болып табылады. Сигналды талдау және жіктеу үшін қолданылатын әдістер мен бағдарламалар электрокардиоргафтың кескінінен немесе жазбасынан алынуы керек математикалық модельдеу нүктелерінің массивтерімен жұмыс істейді. Бұл жұмыстың мақсаты ЭКГ сигналдарының кескіндерін бір өлшемді массивке шығару әдістемесін жасау болды. Ұсынылған алгоритм түстерді өңдеу операцияларын дәйекті жүргізуге және кескін сапасын жақсартуға, масканы қабаттастыруға және ашық қол жетімді Python құралдары мен кітапханаларын қолдана отырып, бір өлшемді нүктелер массивін құруға негізделген. Mit/BIH дерекқорынан алынған үлгілерді сынау нәтижелері және өңдеуге дейінгі және кейінгі кескіндерді салыстыру сигналды алу дәлдігі шамамен 95% екенін көрсетті. Сонымен қатар, ұсынылған қолданба дизайны қарапайым және қол жетімді. Ұсынылған ЭКГ деректерді талдау және өңдеу бағдарламасы болашақта деректерді автоматты түрде талдау және аритмияны немесе басқа патологияларды анықтау мақсатында күрделі бағдарламалық қосымшаларды әзірлеуге үлкен әлеуетке ие.

Түйін сөздер: ЭКГ сигналы, MIT / BIH, Python, кескінді өңдеу, бір өлшемді массив, OpenCV, Matplotlib, NumPy.

Введение. Сигнал электрокардиограммы (ЭКГ) демонстрирует множество информации о состоянии сердечно-сосудистой системы пациента. Одним из важных анализов в ЭКГ является выявление аритмий сердечных сокращений. Мониторинг и своевременное обнаружение опасных аритмий у пациента поможет предотвратить угрозы инсульта или внезапной смерти от сердечной недостаточности [1]. Во многих работах [2, 3] были проведены исследования, направленные на выявление угрожающих жизни аритмий. Данный процесс представляют собой длительную и утомительную процедуру как для пациента, так и для кардиолога. Автоматизация процесса анализа ЭКГ и компьютерная диагностика являются ключевыми и необходимыми технологиями в современной клинической кардиологии [4]. Разработка автоматизированных диагностических инструментов могут иметь решающее значение для правильной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. С этой целью было проведено множество исследований, в которых были использованы различные методы обработки и выделения признаков аритмий из сигналов ЭКГ. К таким методам относятся анализ во временной области [5], статистический метод [6], метод гибридных функций [7], частотный и частотно-временной анализы [8-10]. Однако из-за значительных различий во временных и морфологических характеристиках сигнала ЭКГ среди разных пациентов все еще остается нерешенная проблема точного обнаружения очагов нарушения, что мешает созданию общей классификации сигналов и требует индивидуальный подход. Поскольку ЭКГ сигнал представляет собой целый частотно-временной набор, состоящих из наборов гармонических составляющих сердечных сокращений сетевых помех, шума, мышечного тремора и т.д., например, желудочковый комплекс QRS, который представляет собой комбинацию зубцов Q, R и S, зарегистрированных во время желудочковой стимуляции, является самым большим и наиболее важным комплексом, который виден на ЭКГ. Зубцы Q и S - это нисходящие волны, которые представляют деполяризацию межжелудочковой перегородки слева направо и деполяризацию левого желудочка сердца соответственно. Зубец R - это восходящая волна, которая представляет возбуждение желудочков сердца. Поэтому распознавание необходимых сигналов после применения различных фильтров также очень сложно, особенно при слабой интенсивности сигнала. Поэтому разработка высокоточных методов анализа данных электрокардиограммы актуальна и по сей день.

В научной литературе за последнее десятилетие представлено множество работ [5, 11-13], посвященных разработкам новых методик автоматического анализа ЭКГ. Например, с помощью инструмента дискретного вейвлет-преобразования можно повысить точность и чувствительность распознавания сигналов [14]. Данный подход, который программируется в среде MATLAB для базы данных аритмии MIT/BIH, предполагает удаление артефактов и обнаружения комплекса QRS и аритмии. Как показывают авторы этой статьи, использование этого метода позволяет увеличит чувствительность (99,85%) с минимальной частотой ошибок (0,221%) при диагностировании аритмии. Аналогичный подход был использован в работе [15], где авторы провели качественный анализ данных ЭКГ с использованием сложных гауссовых вейвлетов. Согласно результатам показано, что применение S-преобразования для непрерывной вейвлет-функции позволяет получить более масштабные и точные данные спектра сигнала электрокардиограммы. В другой работе [16] предложено преобразования Эрмита в качестве инструмента для анализа сигналов ЭКГ. Разработанный в MATLAB метод позволяет анализировать и классифицировать части сигналов (комплексы QRS) путем сравнения с базисными формами, построенными с помощью функций Эрмита. Предложенный подход так же дает внушительные результаты и учитывает высокие показатели точности. Садр и Де Чазаль [17] предложили метод обработки с точностью до 82%, основанный на морфологии ЭКГ и интервалах RR.

Из приведенных выше методик следует вывод, что для более точного определения сигналов аритмии для обработки данных необходимо иметь высоко качественные сигналы ЭКГ, которые можно получить непосредственно при измерении на пациенте. Однако к сожалению высоко точная и чувствительная аппаратура не всегда доступна или отсутствует на местах из-за высокой стоимости и необходимого обслуживания [18].

Кроме того, не все программы могут распознавать форматы файлов jpg и tiff, поскольку обработка информации осуществляется с помощью массива точек, с которыми можно работать в вычислительной среде в специальных программных приложениях. В этой статье делается попытка исправить дисбаланс в предыдущих исследованиях путем разработки программы для получения чистого сигнала ЭКГ с высоким качеством разрешения в виде одномерного массива со сканированной электрокардиограммой или записью электронного файла. В этой статье мы предлагаем новый метод обработки изображений с помощью пакетных приложений на языке программирования Python. Новизна нашего подхода состоит в том, что он основан на удобном и эффективном программном пакете, который предназначен для быстрого преобразования данных ЭКГ в формат, пригодный для декодирования и анализа. Такой подход позволяет поставить точный диагноз. С научной и прикладной точек зрения результаты могут быть полезны при разработке медицинских и других компьютерных программ, и мобильных приложений.

Материалы и методы. Для достижения предполагаемого результата необходимо выбрать подходящий инструмент, пакеты и язык программирования. В качестве языка программирования был выбран Python, который является одним из мощных инструментов для создания программ и проектов. Данный язык отличается простотой, доступностью и адаптирован под современные операционные системы и приложения. Python обладает объектно-ориентированными, структурными, высокоуровневыми, функциональными навыками. В этом исследовании мы используем версию Python 4.2.0, которая предоставляет средства программирования на достаточном уровне, включая множество встроенных функций. Кроме того, для Python существует множество внешних библиотек с открытым исходным кодом, которые доступны в Интернете. В нашем исследовании для эффективной обработки изображения в скрипте будут использоваться библиотеки OpenCV, Matplotlib, NumPy [19,20].

x_array представляет собой пакет Python с открытым исходным кодом, который предостав-

ляет инструментарий и структуры данных для N-мерных помеченных массивов [21]. Данный инструмент позволяет объединить интерфейс прикладного программирования с общей моделью данных, включает индексирование и арифметику на основе меток, совместим с NumPy, Matplotlib.

Исходные данные. Изображения ЭКГ сигналов (рис.1) в виде файлов двух форматов *.dat и *.hea были взяты из общедоступной базы данных MIT/BIH из двух источников (https://physionet.org/ and https://ecgpedia.org/).

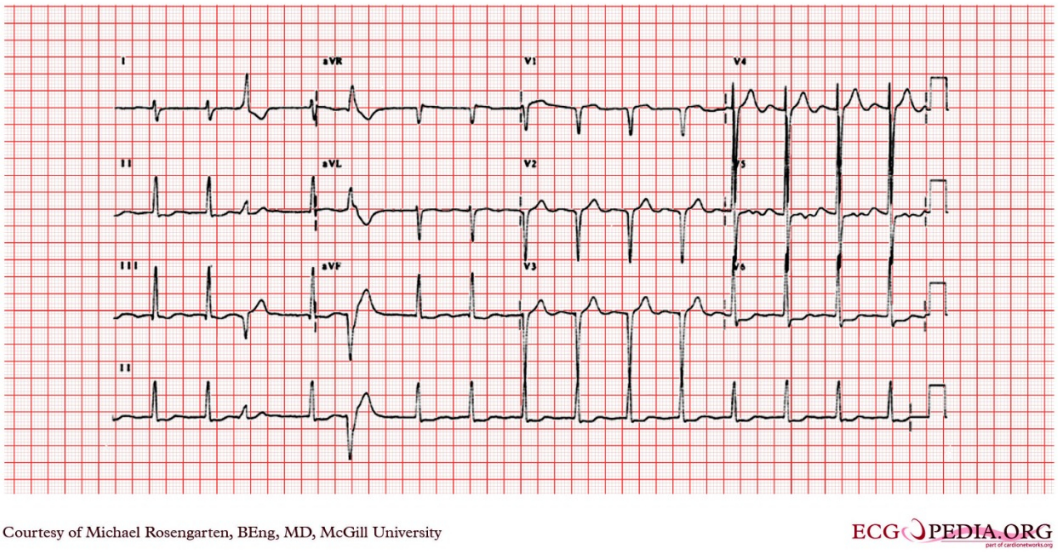


Рис.1 - Рисунок со сканом ЭКГ сигнала

Для дальнейшей работы из каждого изображения вырезалось одна полоса электрокардиограммы (рис.2). Для работы в приложении были отобраны файлы содержащие изображения высокого разрешения. В итоге из 500 файлов было выбрано 100 изображений и 100 записей (100 файлов *.dat и 100 файлов *.hea), которые соответствовали необходимым требованиям. Для построения интерфейса использовалась библиотека PyQt5, т.к. интерфейс этого приложения очень прост и понятен для обычного пользователя.



Рис.2 - Однополосное изображение сигнала ЭКГ

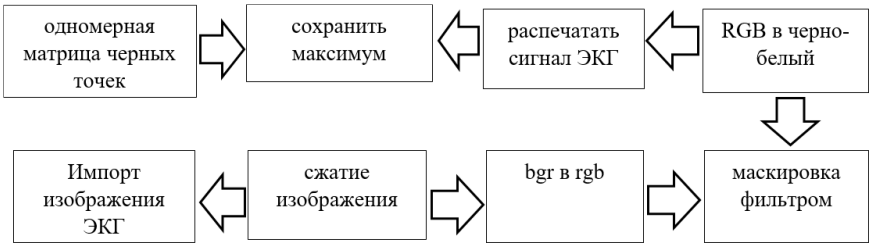


Рис.3 - Блок-схема алгоритма обработки изображений

Построение алгоритма обработки изображений в Python. В зависимости от загруженного типа данных программа выбирает соответствующий алгоритм обработки данных. Рассмотрим их отдельно. В начале рассмотрим алгоритм обработки загруженного изображения.

Для начала импортируем библиотеки:

```
import numpy as np
import cv2
import os
import matplotlib.pyplot as plt
```

Считываем файл изображения через путь к файлу (FILE), который был получен из программы загрузчика:

```
bgr_img_array = cv2.imread(FILE)
```

В переменной bgr_img_array теперь хранится матрица точек изображения. Каждая точка теперь содержит информацию о своем цвете в цветовом формате BGR. Так же, после преобразования рисунка в матрицу, мы можем наблюдать одиночные точки, которые в дальнейшем будут проявляться в виде шумов. Чтобы исключить одиночные точки, которые появились из-за шумов можно применить сжатие изображения для фильтрации шумов. Стоит обратить внимание, что качество загружаемого изображения должно быть выше 100 пикселей, которое прописывается следующим способом:

```
height = 100
width = bgr_img_array. shape [1]/bgr_img_array. shape [0] *height
resized_bgr_img_array = cv2.resize(bgr_img_array, (int(width), height))
```

Выполнив выше указанные операции, сделаем сжатие изображения для исключения одиночных шумов. Теперь сжатая матрица, к которой был применен фильтр шумов, принадлежит к переменной resized_bgr_img_array. Поскольку цвет каждой точки хранится пока в формате BGR, то необходимо изменить данные цвета на формат RGB, который записывается следующим образом:

```
b, g, r = cv2.split(resized_bgr_img_array)
rgb_img = cv2.merge([r, g, b])
```

Теперь данные цветов точек хранятся в формате RGB.

Далее следует исключить лишние цвета из матрицы представленной электрокардиограммы (рис.2). Поскольку сейчас данные цветов хранятся в формате [R, G, B], мы можем через наложение маски из библиотеки OpenCV избавиться от цветов, которые отличаются от черного. Для этого определим границы цветов искомых точек переменными lower (наименьшее значение) и upper (наибольшее значение). Для удобства при дальнейшем написании кода матрицу, в которой хранятся данные изображения, назовем image. Теперь создадим маску, через которую будем исключать ненужные цвета в изображении и назовем ее mask. Переменной output зададим матрицу, на которую уже наложена маска, а пустые точки заполним белым цветом. Код данной программы имеет вид:

```
lower = np. array ([0,0,0], dtype = ”uint8”)
upper = np. array ([150,150,150], dtype = ”uint8”)
image = resized_bgr_img_array
mask = cv2.inRange(image, lower, upper)
output = cv2.bitwise_and (image, image, mask = mask)
output[mask==0] = (255,255,255)
```

Теперь для окончательного выделения черного цвета и их оттенков, преобразуем изображение в черно-белый формат из формата RGB. Для этого применим следующую функцию:

```
out_gray = cv2.cvtColor(output, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
```

Значение переменной out_gray представляет собой матрицу с оставшимися точками, у которых значение цвета от 0 до 150, т.е. от черного к серому. Так же в матрице существуют еще белые точки. Чтобы составить одномерную матрицу, необходимо проверить значения сверху вниз по каждой вертикальной линии. Это выглядит следующим образом. Если ширина изображения X, а высота Y, то мы должны взять линию X и проверять черные точки на высоте Y. Для этого заменим значения X на Y в переменной out_gray, т.к. в ней горизонтальные линии представляют собой Y, а высотой считает X:

```
out_gray_reverse = np. swapaxes (out_gray, 0, 1)
```

После чего мы можем набрать матрицу. Проходим по каждой линии X и Y, сравнивая каждую точку с черным цветом. Полученный результат запишем в ранее инициализированную переменную:

```
ecg_points_all_blacks = []
for i in range (0, len(out_gray_reverse)):
vertical_line_founds = []
for j in range (0, len(out_gray_reverse[i])):
if(int(out_gray_reverse[i][j]) < 150):
vertical_line_founds. append(j)
ecg_points_all_blacks. append(vertical_line_founds)
```

Значением переменной ecg_points_all_blacks является двумерной матрицей, в которой первым уровнем является линия, где были черные точки. Данная линия содержит координаты оси Y для каждой черной точки, которые имеют следующий вид:

```
[12, 26], [12, 34], [18, 23, 32, 40], 41, 46, 46, 46, 46, 46, 46, 46,
```

где на первой линии расположены две черные точки со значениями координат 12 и 26; на второй линии расположены две черные точки с координатами 12 и 34. В линиях встречается ряд черных точек вроде [15-17]. Приравнивать значение в одномерном массиве к арифметической средней приведет в будущем к проблеме вычисления экстремумов: пиков R, Q и S. Поэтому лучшим решением будет сохранить общую среднюю точку путем суммирования координат по оси Y всех черных точек в данной линии, которое потом делится на их количество.

Применяя проверку к каждой точке по принадлежности к нижней или верней стороне от средней линии, в зависимости от результата сохраня-

ем соответсвенно максимальные или минимальные точки в рядах как [15-17]. Таким образом мы убираем множество точек, которые стоят друг за другом. Так же сохраняем экстремумы, показывая только максимумы (сохранение минимумов осуществляется идентичным кодом):

```
ecg_points_blacks_maximums = []
for i in range (0, len(ecg_points_all_blacks)):
if(len(ecg_points_all_blacks[i]) == 0):
continue
last_point = 0
max_points = []
for j in range (0, len(ecg_points_all_blacks[i])):
if (j == 0):
last_point = ecg_points_all_blacks[i][j]
max_points. append(last_point)
elif (j != 0 and last_point != (ecg_points_all_blacks[i][j] – 1)):
last_point = ecg_points_all_blacks[i][j]
max_points. append(last_point)
else:
last_point = ecg_points_all_blacks[i][j]
continue
if(len(max_points) == 1):
max_points = max_points [0]
ecg_points_blacks_maximums. append(max_points)
```

Конкатенируем матрицы с точками, убирая идентичные точки, и выводим результат следующим образом:

```
print(ecg_points_blacks_result)
print (”Длина сигнала: ” + len(ecg_points_blacks_result) + ” точек”)
```

В окне консоли увидим результат, который приведен в качестве примера:

```
[45, 45, 45, 45, 45, 45, 44, 43, 43, 43, 43, 43, 43, 43, 31, 14, 12,
15, 15, 15, 15, 15, 15, 15, 15, 15, 15, 15, 38, 43]
```

Длина сигнала: 748 точек.

Извлечение данных из файлов с расширениями .dat и. hea. В данном контексте намного проще, поскольку в современных аппаратах электронные записи ведутся с огромной частотой, и сигналы сразу записываются в виде одномерного массива. Проблема состоит в том, как эти данные правильно прочесть. Эти файлы хранят следующую информацию: частота дискретизации, длина сигнала, дата записи, время записи, часовой пояс в которой была сделана запись, единица измерения, название сигнала, комментарии и множество других значении. Чтобы прочитать электронные сигналы и вывести из них точки нам поможет библиотека wfdb, которая предназначена для работы с файловыми данными из базы MIT и работа с файлами *.dat и *.hea. Выбрав файлы в программе и нажав кнопку «Загрузить», мы идентифицируем новое имя для двух файлов. Имена файлов должны быть одинаковыми.

```
record = wfdb. rdsamp(PATH)
points = record [0]
```

где PATH-путь к файлам и ранее идентифицированное название файлов, points-одномерный массив со всеми точками.

Результаты и обсуждение. Интерфейс разработанного приложения для преобразования сигнала показан на рис.4. Как видно, в окне приложения предлагается выбрать тип данных, которые представляются в виде изображения или записи. В зависимости от выбранного типа программа запросит необходимые файлы для чтения. Как видно из рисунка при выборе записи из MIT-BIH программа предлагает выбрать два соответствующих файла, которые хранятся в разных форматах. В ином случае нужно выбрать всего один файл скана либо фотографии. Интерфейс разработанного приложения выглядит довольно просто и понятно для любого пользователя, что не требует дополнительных инструкций и введения других операций для загрузки файла.

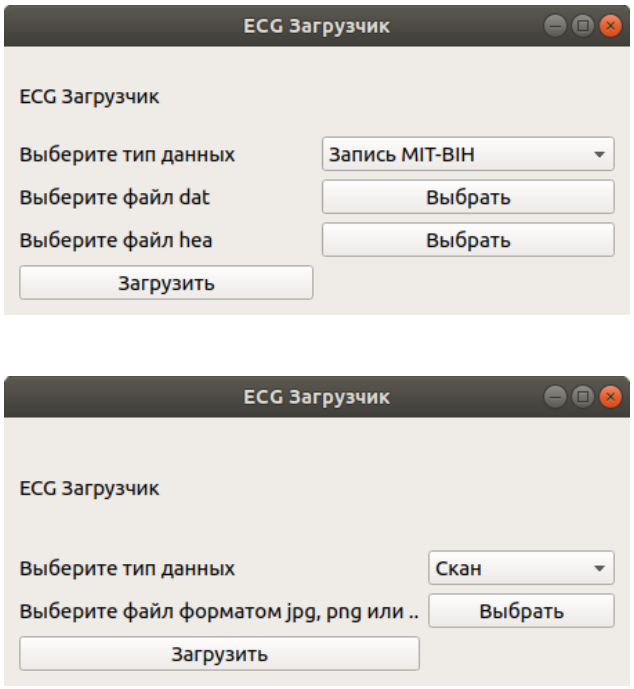


Рис.4 - Интерфейс приложения для чтения ЭКГ сигналов с изображений и электронных записей

После выбора файла в окне загрузчика, на экране открывается окно с графиком изображения в виде одномерного массива (рис.5), который можно использовать для приложения, анализирующего предоставленный полный сигнал ЭКГ.

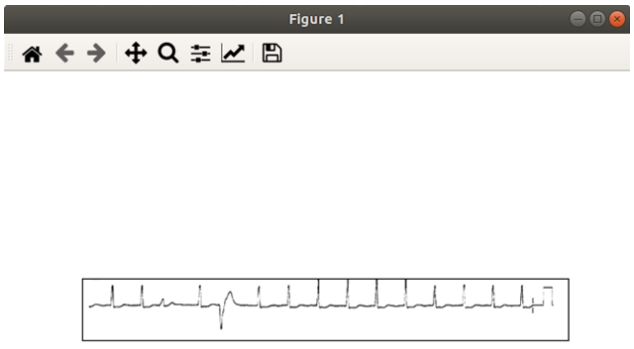


Рис.5 - График одномерного массива построенный с помощью библиотеки matplotlib

Как видно, предложенный алгоритм обработки сканов и других изображений электрокардиограмм демонстрирует хорошие результаты. Используемый подход наложения маски с исключением ненужных цветов, как оказалось, является весьма эффективным. Как видно на рис.6 сравнение результатов до и после обработки скана разработанная программа довольно точно идентифицирует положение точек, соответствующие ЭКГ сигналу. Кроме того, сохраняется масштаб и малейшие отклонения, которые могут скрывать в себе очень важную информацию при расшифровке.



Рис.6 - До и после наложения маски с фильтром выделения черного цвета

Аналогичные результаты были получены после обработки записей MIT / BIH. Сравнительный анализ 100 образцов изображений до и после обработки показывают (на рис.6) полное совпадение сигналов ЭКГ. Такой высокий показатель связан также с предварительной подготовкой изображения и правильной последовательностью распознавания положения точек, которые были предложены при разработке алгоритмов распознавания сигнала. Таким образом, данный подход повышает чувствительность и точность методики обработки ЭКГ изображений, а разработанный в Python проект представляет собой быстрое и простое в пользовании приложение, что является очень необходимым при анализе сигнала и его классификации. Например, для классификации сигналов ЭКГ используют такие признаки как начало и смещение волн, QRS и период, которые выявляются при анализе во временной области сигнала [1].

Для извлечения одномерного массива из изображения применялась множество других подходов. В работе [22] предложен способ распознавания формы сигнала во временной области на основе одномерной сверточной нейронной сети. В данном подходе предложено построение нейронной сети для прямого распознавания образов в форме волны. Несколько другой подход был применен в [23] для обработки изображений рамановских оптоволоконных датчиков. Суть предложенной авторами методики состояла в объединении одномерных рамановских сигналов в двумерный массив с целью подавления шума и улучшении самого сигнала при обработке. Приведенные результаты работ, как и в этой статье, демонстрируют высокую эффективность используемых методик обработки изображений с целью повышения качества сигнала. Однако предложенные методики учитывают только специфику того сигнала, под который они были разработаны, и не являются универсальными в отличие от нашего подхода. Разработанный в этой работе алгоритм может быть усовершенствован и адаптирован для извлечения не только ЭКГ сигналов, но и для других измерений, которые используют схожую методику записи данных.

Расширенный фильтр Калмана в сочетании с Дискретно-Вейвлет преобразованием, реализуется для улучшения качества сигналов ЭКГ, доступных на выходе РФК. Производительность алгоритма оценивается двумя параметрами: отношения сигнала к шуму (ОСШ (дБ) – и средне-

квадратичной ошибки (СКО). Результаты эффективности при использование математической модели где погрешности в Расширенном фильтре Калмана стали на много меньше, в сравнение с Вейвлет преобразованием. Фильтрации сведены в таблицу 1 для сравнительного исследования с помощью РФК удалось подавить шумы.

Таблица 1 - Результат эффективности при использовании математической модели в РФК и ВП

Номер ЭКГ	ВП		РФК	
	ОСШ (дБ)	СКО	ОСШ (дБ)	СКО
101	6,7326	2,0e-03	3,8286	1,73e-04
105	3,8545	3,12e-04	2,5305	1,28e-07
106	8,4883	6,0e-03	4,1280	1,04e-03
108	9,0482	1,7e-03	5,2344	1,5e-05
111	5,3831	5,01e-04	2,9266	2,1e-05
115	10,8044	9,34e-03	9,7907	6,46e-04
117	6,5982	5,76e-03	4,4769	2,31e-05
118	9,5621	6,30e-04	7,3690	2,6e-05
119	8,9988	2,06e-02	6,5206	1,4e-04
120	7,3859	6,89e-04	3,4411	1,57e-06
121	5,7911	4,7e-03	3,3853	3,03e-04
144	8,7677	8,1e-03	7,5622	6,81e-05
145	9,9772	2,6e-03	6,3583	1,7e-04
156	5,7318	4,0e-03	3,6376	3,5e-05
158	10,1275	9,13e-03	5,7961	4,3e-05
160	6,2156	6,13e-04	5,9036	1,3e-06
161	8,0652	2,4e-03	7,7988	1,06e-04
165	7,5938	6,89e-04	6,3384	1,39e-04
166	5,7915	4,7e-03	5,3323	3,01e-05
167	8,7677	7,0e-03	8,2256	5,81e-05
171	9,7297	2,7e-03	7,8335	2,5e-06
172	4,7318	4,0e-03	3,7663	3,3e-06
175	9,7215	4,41e-03	4,7581	2,89e-07
183	5,7629	5,30e-04	5,3690	2,8e-05
188	7,9624	6,57e-04	7,9075	3,3e-05

Аналогичный подход был использован в [24], где авторы разработали алгоритм восстановления изображений в массиве с помощью одномерной интегрированной системы обработки изоб-

ражений. На основе теории геометрической оптики и теории изучения глубины изображений был разработанный алгоритм заполнение недостающих точек происходит по имитационной карте глубины изображений путем сравнения и оценки качества изображения. Более усовершенствованную технологию обработки растровых изображений представили Khamdamov и др. [25]. Новизной их подхода являлось использование вейвлет-функция Daubechies для фильтрации, сжатия и сглаживания двумерных сигналов. Алгоритм вычислительных процессов представлен в среде OpenMP на языке C/C++, который является более сложным и сопоставим не для всех приложений по сравнению с Python и его доступной библиотекой, и пакетом инструментов с открытым исходным кодом.

Выводы. Согласно представленной методики и результатам, можно сделать следующий вывод, что в настоящей работе разработана новая методика обработки изображений и записей ЭКГ сигналов в виде одномерного массива. Использование последовательный операций выбора формата обработки цвета, улучшения качества изображений, наложения маски и построение одномерного массива точек позволяет распознать сигнал ЭКГ с высокой точностью. Сравнительный анализ изображений до и после обработки показывает хорошее соответствие сигналов ЭКГ, что свидетельствует о высокой чувствительности предложенного метода. Кроме того, использование пакетов и библиотек Python с открытым доступом позволяет разработать простой и доступный дизайн приложения для быстрой обработки. Цель исследования была достигнута путем разработки приложения Python для преобразования фото или отсканированных изображений в одномерный массив точек, который затем может быть обработан с помощью программы декодирования. Данная методика и предложенная программа для анализа и обработки данных ЭКГ имеет большой потенциал в будущем для разработки более сложных приложений для автоматического анализа данных и более быстрого определения аритмий и других патологий у пациентов.

References

1. Bhirud, B., & Pachghare, V. K. Arrhythmia Detection Using ECG Signal: A Survey //Proceeding of International Conference on Computational Science and Applications. -2020.-P.329-341. DOI 10.1007/978-981-15-0790-8_32.

2. Trayanova, N. A., Boyle, P. M., & Nikolov, P. P. Personalized imaging and modeling strategies for arrhythmia prevention and therapy //Current opinion in biomedical engineering -2018. Vol.5.-P.21-28. DOI 10.1016/j.cobme.2017.11.007

3. Chatha, S. R., Chahal, C. A. A., Westwood, M., & Khanji, M. Arrhythmia and sarcoidosis: the role of myocardial tissue characterization to guide diagnosis and management //European Heart Journal-Cardiovascular Imaging – 2020.-Vol.21(3): 344. DOI 10.1093/ehjci/jez229.

4. Abdelazim I.A., Bekmukhambetov Y., Aringazina R., Shikanova S., Amer O.O., Zhurabekova G., Otessin M.A., Astrakhanov A.R. The outcome of hypertensive disorders with pregnancy. //Family Medicine and Primary Care. -2020.9(3). -P.1678-1683. DOI 10.4103/jfmpc.jfmpc_1054_19

5. Raj S., Maurya K., & Ray K. C. A knowledge-based real time embedded platform for arrhythmia beat classification//Biomedical Engineering Letters. -2015. Vol.5.-P.271-280. DOI 10.1007/s13534-015-0196-9.

6. Ye C., Kumar B. V., & Coimbra M. T. Heartbeat classification using morphological and dynamic features of ECG signals //IEEE Transactions on Biomedical Engineering. -2012. Vol.59(10). -P.2930-2941. DOI 10.1109/TBME.2012.2213253.

7. Zhang, Z., Dong, J., Luo, X., Choi, K. S., & Wu, X. Heartbeat classification using disease-specific

feature selection//Computers in biology and medicine//Computers in Biology and medicine. -2014. Vol.46. P.79-89. DOI 10.1016/j.compbiomed.2013.11.019.

8. Yıldırım Ö., Pławiak P., Tan R. S., & Acharya U. R. Arrhythmia detection using deep convolutional neural network with long duration ECG signals//Computers in biology and medicine -2018. Vol.102.-P.411-420. DOI 10.1016/j.compbiomed.2018.09.009.

9. Patil V., & Patil S. N. Robust system for patient specific classification of ECG signal using PCA and Neural Network// IRJET. -2015.-Vol.2(9). e-ISSN: 2395-0056.

10. Raj, S., & Ray, K. C. ECG signal analysis using DCT-based DOST and PSO optimized SVM //IEEE Transactions on instrumentation and measurement. -2017.66(3), P.470-478. DOI 10.1109/TIM.2016.2642758.

11. D'Aloia M., Longo A., & Rizzi M. Noisy ECG signal analysis for automatic peak detection //Information. - 2019, 10(2), P.35. DOI 10.3390/info10020035.

12. Wasimuddin M., Elleithy K., Abuzneid A., Faezipour M., & Abuzaghleh O. ECG Signal Analysis Using 2-D Image Classification with Convolutional Neural Network//2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI). -2019.-P.949-954.

13. Barmpoutis P., Dimitropoulos K., Apostolidis A., & Grammalidis N. Multi-lead ECG signal analysis for myocardial infarction detection and localization through the mapping of Grassmannian and Euclidean features into a common Hilbert space//Biomedical Signal Processing and Control.-2019.-Vol.52.-P.111-119. DOI 10.1016/j.bspc.2019.04.003.

14. Kaur I., Rajni R. & Marwaha A. ECG Signal Analysis and Arrhythmia Detection using Wavelet Transform//Institute of Chemists (India).-2016.-P.1-11. DOI 10.1007/s40031-016-0247-3.

15. S. Agarwal, V. Krishnamoorthy and S. Pratiher, "ECG signal analysis using wavelet coherence and s-transform for classification of cardiovascular diseases//International Conference on Advances in Computing. - 2016. DOI 10.1109/ICACCI.2016.7732481.

16. Vulaj Z., Draganić A., Brajović M., & Orović I. A tool for ECG signal analysis using standard and optimized Hermite transform. In 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing -2017. DOI 10.1109/MECO.2017.7977145.

17. Sadr. N., Chazal. P. Non-invasive Diagnosis of Sleep Apnoea Using ECG and Respiratory Bands //In 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.-2019.DOI 10.1109/EMBC.2019.8857414.

18. Bazan V., Marchlinski.F. Usefulness of the 12-Lead ECG to Identify Epicardial Ventricular Substrate and Epicardial Ventricular Tachycardia Site of Origin//Cardiac Mapping. -2019. DOI 10.1002/9781119152637.ch81.

19. Nelli. F. Python data analytics: with pandas, numpy, and matplotlib//Apress. -2018. DOI 10.1007/978-1-4842-3913-1.

20. Lebanon G., El-Geish M. Visualizing Data in R and Python: An introduction to the Data Industry//In: Computing with Data. -2018.-P.277-324. DOI 10.1007/978-3-319-98149-9_8.

21. Hoyer S., & Hamman J. xarray: ND labeled arrays and datasets in Python //Journal of Open Research Software. -2017. Vol.5(10). -P.1-6. DOI 10.5334/jors.148.

22. Wan X., Song H., Luo L., Li Z., Sheng G., & Jiang X. Pattern recognition of partial discharge image based on one-dimensional convolutional neural network//IEEE. -2018. DOI 10.1109/CMD.2018.8535761.

23. Soto M. A., Ramírez J. A., & Thévenaz L. Reaching millikelvin resolution in Raman distributed

temperature sensing using image processing//SPIE. -2016.-Vol.9916. DOI 10.1117/12.2236934.

24. Han Y., Wang S., Wei J., & Song C. Hole filling algorithm for image array of one-dimensional integrated imaging//In Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology VI. -2019. Vol.11187:111870K. DOI 10.1117/12.2538177.

25. Khamdamov.U., Zaynidinov. H. Parallel algorithms for bitmap image processing based on daubechies wavelets//In 2018 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)). -2018. DOI 10.1109/ICCSN.2018.8488270.

Сведение об авторе

Б. Рысбекқызы - PhD, и.о.доцента Карагандинского технического университета им. Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан, e-mail: bakhytgulz@mail.ru.

Information about the author

B. Rysbekkyzy - PhD, Acting Associate Professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: bakhytgulz@mail.ru.

IRSTI 50.53.15 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1476**

PREDICTIVE MODEL OF LABORATORY CONTROL OF CHEMICAL COMPOSITION OF MINING AND METALLURGICAL PRODUCTS

[1]L. Akisheva ✉, [2]A. Utegenov, [2]A. Kyzken

[1]Nazarbayev Intellectual School, Astana, Kazakhstan,
[2]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan

✉ *Corresponding-author: lenaraakisheva@gmail.com*

The relevance of the research is determined by the need to move from laboratory control to predictive quality management of metallurgical products. The delay in laboratory analysis, in practice, increases the risk of product release outside of regulatory requirements and reduces the efficiency of technological solutions.

The paper develops the architecture of an intelligent laboratory chemical composition control system based on the integration of LIMS, SCADA/MES data and real data obtained from open sources. Ensemble models (Gradient Boosting, ANN, LSTM, Stacking) have been implemented to predict the mass fractions of chemical elements.

According to the results of the study, quantitative indicators were obtained: R2 for Cr — 0.94, RMSE — 0.72%, MAE — 0.48%, which is more than two times lower than the permissible standard deviation (± 1.0%). For the elements P and S, the absolute error does not exceed 0.01%. The ensemble model maintains forecasting stability with varying input parameters (±3-5%) and does not reveal a statistically significant bias in estimates, which is confirmed by the Bias value close to zero. Qualitative indicators indicate fairly stable forecasts, interpretability and technological validity of the identified dependencies. The developed system ensures the transition from laboratory to proactive quality management, reducing decision-making time from 2-4 hours to several minutes, reducing the risk of production outside the standards by 15-25%. The practical significance of the research lies in reducing decision-making time, reducing the risk of marriage by 15-25%, and the possibility of integration into the company' s digital twin.

Further research is aimed at introducing online learning, expanding to other ferroalloys, and integrating with physico-chemical process models.

Keywords: laboratory control, chemical composition, ferrochrome, machine learning, ensemble model, predictive analytics, digital twin, metallurgical production.

ПРЕДИКТИВНАЯ МОДЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОГО КОНТРОЛЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОДУКЦИИ ГОРНОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

[1]Л. Акишева ✉, [2]А. Утегенов, [2]А. Кызкен

[1]Назарбаев интеллектуальная школа, Астана, Казахстан,
[2]Казахский университет технологии и бизнеса имени К.Кулажанова, Астана, Казахстан,
e-mail: lenaraakisheva@gmail.com

Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от лабораторного контроля к предиктивному управлению качеством металлургической продукции. Задержка лабораторного анализа, на практике повышает риск выпуска продукции вне нормативных требований и снижает оперативность технологических решений.

В работе разработана архитектура интеллектуальной системы лабораторного контроля химического состава на основе интеграции данных LIMS, SCADA/MES и реальных данных полученных из открытых источников. Реализованы ансамблевые модели (Gradient Boosting, ANN, LSTM, Stacking) для прогнозирования массовых долей химических элементов.

По результатам исследования получены количественные показатели: R^2 для Cr — 0.94, RMSE — 0.72 %, MAE — 0.48 %, что более чем в два раза ниже допустимого нормативного отклонения (±1.0 %). Для элементов P и S абсолютная ошибка не превышает 0.01 %. Ансамблевая модель сохраняет стабильность прогнозирования при варьировании входных параметров (±3–5 %) не выявляет статистически значимого смещения оценок, что подтверждается близким к нулю значением Bias. Качественные показатели свидетельствуют об достаточно устойчивых прогнозах, интерпретируемости и технологической обоснованности выявленных зависимостей. Разработанная система обеспечивает переход от лабораторного к проактивному управлению качеством, сокращая время принятия решений с 2–4 часов до нескольких минут, снижая риск выпуска продукции вне нормативов на 15–25 %. Практическое значение исследования заключается в сокращении времени принятия решений, снижении риска брака на 15–25 %, возможности интеграции в цифровой двойник предприятия.

Дальнейшие исследования направлены на внедрение онлайн-обучения, расширение на другие ферросплавы и интеграцию с физико-химическими моделями процесса.

Ключевые слова: лабораторный контроль, химический состав, феррохром, машинное обучение, ансамблевая модель, предиктивная аналитика, цифровой двойник, металлургическое производство.

ТАУ-КЕН МЕТАЛЛУРГИЯ ӨНДІРІСІ ӨНІМДЕРІНІҢ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫН ЗЕРТХАНАЛЫҚ БАҚЫЛАУДЫҢ БОЛЖАМДЫ МОДЕЛІ

[1]Л. Акишева✉, [2]А. Өтегенов, [2]А. Кызкен

[1]Назарбаев зияткерлік мектебі, Астана, Қазақстан,

[2]Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,

e-mail: lenaraakisheva@gmail.com

Зерттеудің өзектілігі зертханалық бақылаудан металлургиялық өнімнің сапасын болжамды басқаруға көшу қажеттілігіне байланысты. Зертханалық талдаудың кешігуі іс жүзінде нормативтік талаптардан тыс өнім шығару қаупін арттырады және технологиялық шешімдердің жеделдігін төмендетеді.

Жұмыста LIMS, SCADA/MES деректерін және ашық көздерден алынған нақты деректерді біріктіру негізінде химиялық құрамды зертханалық бақылаудың интеллектуалды жүйесінің архитектурасы әзірленді. Химиялық элементтердің массалық үлестерін болжау үшін ансамбльдік модельдер (gradient Boosting, ANN, LSTM, Stacking) іске асырылды.

Зерттеу нәтижелері бойынша сандық көрсеткіштер алынды: Cr-0.94 үшін R2, RMSE — 0.72%, MAE — 0.48%, бұл рұқсат етілген нормативтік ауытқудан екі есе төмен (±1.0 %). P және S элементтері үшін абсолютті қате 0.01% - дан аспайды. Ансамбль моделі кіріс параметрлері өзгерген кезде болжау тұрақтылығын сақтайды (±3-5%) нөлге жақын Bias мәнімен расталған бағалаудың статистикалық маңызды ауытқуын анықтамайды. Сапалық көрсеткіштер жеткілікті тұрақты болжамдарды, анықталған тәуелділіктердің түсіндірілуін және технологиялық негізділігін көрсетеді. Әзірленген жүйе зертханадан сапаны белсенді басқаруға көшуді қамтамасыз етеді, шешім қабылдау уақытын 2-4 сағаттан бірнеше минутқа дейін қысқартады, нормативтерден тыс өнім шығару қаупін 15-25% төмендетеді. Зерттеудің практикалық маңыздылығы шешім қабылдау уақытын қысқарту, неке қаупін 15-25% төмендету, кәсіпорынның цифрлық егізіне интеграциялау мүмкіндігі болып табылады.

Әрі қарайғы зерттеулер онлайн оқытуды енгізуге, басқа ферроқорытпаларға кеңейтуге және процестің физика-химиялық модельдерімен интеграциялауға бағытталған.

Түйін сөздер: зертханалық бақылау, химиялық құрам, феррохром, машиналық оқыту, ансамбльдік модель, болжамды аналитика, сандық қосарланған, металлургиялық өндіріс.

Introduction. In the context of the digital transformation of industry and the implementation of Industry 4.0 concepts, ensuring sustainable and manageable product quality in mining and metallurgical production is of particular importance. For enterprises of this profile, product quality is determined by a set of physico-chemical parameters (mass fraction of basic and impurity elements, granulometric composition, humidity, mechanical properties, etc.), a significant part of which is confirmed by the results of laboratory analysis. Despite the high level of automation of technological processes (SCADA, MES, ERP), laboratory control remains the key tool for quality verification and management decision-making.

However, the traditional organization of laboratory control is characterized by a time delay between sampling and obtaining analysis results, measurement discreteness, the influence of the human factor, as well as fragmented integration with production information systems. As a result, management impacts on the technological process are often reactive and form after the occurrence of deviations. This reduces management efficiency, increases product quality variability, leads to overspending of raw materials, energy resources and an increase in the share of substandard products.

Modern research in the field of digital twins and data mining shows that combining laboratory results with streaming data from technological sensors makes it possible to form predictive quality models that implement the functions of ”virtual laboratory control” (soft sensors). This approach ensures that key indicators are predicted until the actual laboratory data is obtained, which transforms the quality management system from a reactive to a proactive one. At the same time, the development of a correct data integration architecture, time series synchronization algorithms, and machine learning methods that are resistant to noise and incompleteness of information plays a special role.

For mining and metallurgical enterprises of the Republic of Kazakhstan, the task of digitalization of laboratory control is becoming strategically important in the context of increasing requirements for the quality of export products, the need to reduce production losses and the introduction of intelligent control systems. Therefore, the development of methods for the intelligent analysis of laboratory data in the structure of the digital twin of metallurgical production is an urgent scientific and practical task aimed at improving the accuracy of quality forecasting, reducing technological risks and improving the overall efficiency of the production system.

Machine learning methods and ensemble algorithms are actively used in research on predicting the chemical composition and quality indicators of metallurgical products. In the work of Li et al. [1] a sinter quality prediction model based on causality analysis and stacking integration is proposed. The DRBoost method for predicting the content of chemical elements in steel was developed by Song et al. [2], which shows high accuracy in predicting key indicators (C, Si, Mn, etc.). The GA-RNN model for assessing the effect of the chemical composition of raw materials on the quality of sinter is presented in the study by Li et al. [3]. Thampiriyanon [4] discusses the prediction of the phase structure of a metal based on its chemical composition. The ANN model for predicting sinter properties was proposed by Sahoo & Roy [5].

The problem of time delay in laboratory tests is considered in the work of Ma et al. [6], where a two-stage soft-sensor model is proposed to compensate for measurement delays. The use of time-aware LSTM for processing irregular laboratory data is described in a study by Zheng et al. [7]. A review of data-driven soft sensing in metallurgy is presented by Yan et al. [8], where the problems of model stability and data drift are analyzed. Approaches to modeling soft-sensor systems in blast furnace production are systematized in the work of Luo et al. [9].

The integration of laboratory and technological data for predicting product quality is reviewed by Liu et al. [10]. In a study by Fudyma et al. [11] analyzes the use of digital twins and virtual sensors in continuous metallurgical processes. An overview of the application of ML in the steelmaking industry, where laboratory indicators are considered as reference training marks, is presented by Zhang

et al. [12].

Modern research confirms the high efficiency of machine learning and soft-sensor technologies in predicting the chemical composition and quality of metallurgical products. However, the scientific problem of building an integrated model of laboratory chemical composition control that combines predictive algorithms, delayed measurement processing, and architectural integration into the digital enterprise management circuit remains relevant and requires further research.

The analysis of publications shows:

Chemical composition forecasting is actively developing, especially in sintering and steelmaking processes.

Most models are focused on specific indicators (Si, C, basicity, etc.) rather than a comprehensive model of laboratory control.

Soft-sensor models are being developed to compensate for delays in laboratory measurements.

The integration of models into digital counterparts is beginning, but so far mainly at the conceptual level.

Despite a significant amount of work:

- there is no unified model of laboratory chemical composition control integrated into a digital twin;

- there are few studies linking LIMS + SCADA + ML into a single system;

- there is not enough work to assess the uncertainty of the forecast of laboratory parameters;

-there is practically no research on full-cycle metallurgical enterprises (mining → enrichment → smelting);

- research on the stability of models when the raw material base changes.

Taking into account the analysis of sources, the purpose of the study is to develop and validate an intelligent predictive laboratory model for monitoring the chemical composition of metallurgical products based on the integration of technological, laboratory and historical data to ensure high forecast accuracy and the possibility of integration into the digital twin of the enterprise.

Materials and methods. The formation of a dataset for the laboratory control model of the chemical composition of ferrochrome is based on the integration of open sources, modern scientific publications and statistically sound generation of synthetic data.

At the first stage, industry reports (ERG, USGS, World Steel, ICDA) and international ISO standards are used to determine the regulatory ranges of Cr, C, Si, Mn, P, and S content. The data obtained sets the boundary conditions of the model and ensures the physical realism of the generated array.

The next step analyzes scientific publications from 2022-2025, from which the structures of input features, typical statistical characteristics, and applied machine learning methods are extracted. The distribution parameters (mean μ and standard deviation σ) are calculated, which are necessary for statistical modeling of variations in chemical composition.

Since open sources do not contain detailed time series, a synthetic dataset is generated using the Monte Carlo method with the addition of Gaussian noise within regulatory limits. This allows us to form a representative sample for analyzing the sensitivity and stability of algorithms.

The finished data is structured in the form of a training matrix X (raw materials and technological parameters), a target vector Y (chemical composition of products). The resulting hybrid dataset combines benchmark data from publications and synthetic generation used for training, validation, and model testing.

The object of the study is the production of high-carbon ferrochrome at the Aksu Ferroalloy Plant (Aksu, Republic of Kazakhstan).

According to ERG’ s open reports [13], the company is one of the world’ s largest producers of ferrochrome, with an annual production capacity of over 1 million tons of ferroalloys. Production is carried out in electric arc ore thermal furnaces.

The chemical composition of finished products is regulated by international standards (ISO 5448) and industry requirements [14].

Figure 1 shows a block diagram of the hybrid dataset formation. The flowchart reflects the methodology of forming a hybrid dataset for a model of laboratory control of the chemical composition of ferrochrome.

At the processing stage, indicators are extracted, units of measurement are unified, and data is normalized.

Since open sources do not contain detailed time series of technological parameters, a synthetic dataset has been formed based on statistical ranges published in [1-3, 14].

The generation was performed by the Monte Carlo method with a normal f-la1 distribution:

$$X syn = \mu + \sigma Z, \quad (1)$$

where

μ - is the average value of the indicator for open sources;

σ - is an estimate of the standard deviation;

$Z \sim (0,1)$.

The volume of the synthetic sample was 15,000 records. This approach is used exclusively for analyzing the sensitivity of the model and evaluating the robustness of algorithms.

The task of laboratory control of chemical composition is formulated as a multidimensional regression of f-la (2):

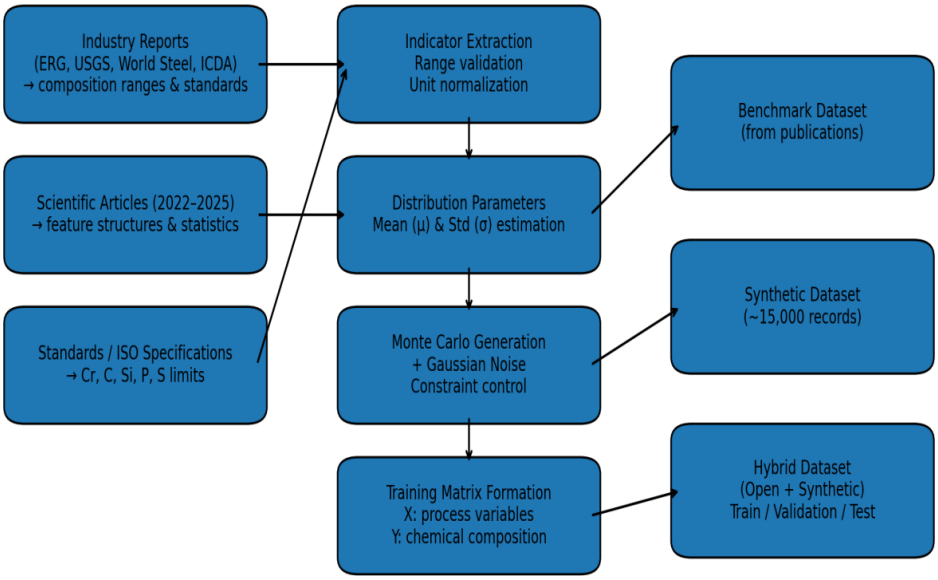


Fig.1 - Block diagram of the hybrid dataset formation

$$Y = f(X) + \varepsilon, \quad (2)$$

where

$Y = \{Cr, C, Si, Mn, P, S\}$ is the predicted chemical composition;

X - is a set of technological and raw material parameters;

f is a nonlinear function approximated by machine learning algorithms.

The following methods were used:

- Gradient Boosting (XGBoost, CatBoost);
- Artificial Neural Networks (ANN);
- LSTM (to account for time dynamics);
- Stacking ensemble.

Evaluation metrics:

- MAE, RMSE, R2.

The choice of methods is justified by publications [1], [2], [6], [7].

All ranges of chemical composition are based on open statistical sources [13], [14] and scientific

publications [1-3].

The synthetic dataset is based on published distributions, which ensures reproducibility of the study without using confidential production data.

Results and discussion. After forming a hybrid dataset and constructing regression models, the accuracy of predicting the chemical composition of high-carbon ferrochrome was evaluated.

The results are presented in the form of quantitative indicators of model quality, error distribution analysis, and comparison of machine learning algorithms.

Table 1 shows a comparative assessment of the quality of various algorithms for predicting the chemical composition of ferrochrome.

The highest accuracy was shown by the ensemble model (Stacking), which provided the maximum value of the coefficient of determination $R^2 = 0.94$ for the Cr content and the minimum values of RMSE and MAE.

Individual models (CatBoost, ANN, and LSTM) demonstrate comparable but lower accuracy rates (R2 in the range of 0.89–0.91). The advantage of the ensemble approach is to combine the strengths of various algorithms and reduce the impact of random errors.

The differences between the models are noticeable by the RMSE metric, showing a more stable performance of the ensemble in predicting fluctuations in chemical composition.

Table 1 - Comparison of models

Model	R^2 (Cr)	R^2 (C)	RMSE (Cr), %	MAE (Cr), %
CatBoost	0.91	0.88	0.85	0.56
ANN	0.89	0.86	0.92	0.63
LSTM	0.9	0.87	0.88	0.59
Ансамбль (Stacking)	0.94	0.91	0.72	0.48

Table 2 - Metrics of the ensemble model

Element	R^2	RMSE, %	MAE, %
Cr	0.94	0.72	0.48
C	0.91	0.41	0.29
Si	0.88	0.35	0.22
Mn	0.86	0.28	0.18
P	0.82	0.012	0.008
S	0.8	0.01	0.006

Table 2 shows the quality metrics of the ensemble model for all predicted elements (*Cr, C, Si, Mn, P, S*).

High accuracy was achieved for chromium (R2 = 0.94), which is explained by its dominant share in the ferrochrome composition and relatively lower variability.

For C and Si, the R^2 values are 0.91 and 0.88, respectively, high predictive ability of the model.

For elements with low mass content (P and S), the coefficient of determination is slightly lower (0.80–0.82), the absolute error values remain minimal (MAE less than 0.01%), meets the requirements of regulatory tolerances.

The results obtained confirm the stability of the model for all key components of the chemical composition.

The graph in Fig.2 shows a comparative analysis of the accuracy of various machine learning algorithms in predicting the mass fraction of chromium (Cr) in the composition of high-carbon ferrochrome.

Four models were implemented in the study: CatBoost, Artificial neural network (ANN), LSTM, and the Stacking ensemble model.

The coefficient of determination R^2 was used as a comparison criterion, reflecting the proportion of the explained variance of the target variable.

The results show that the best indicators were achieved by the Stacking ensemble model (R^2 = 0.94), which indicates a high degree of compliance of the predicted values with the actual data.

The CatBoost and LSTM models have similar R^2 values (0.91 and 0.90, respectively), and they correctly model the nonlinear dependencies between technological parameters and chemical composition.

ANN (R^2 = 0.89) showed a low result, which is due to the sensitivity of the architecture to the distribution of input data and learning parameters.

The results obtained confirm the expediency of using an ensemble approach combining the advantages of boosting and neural network models.

High R^2 values for all algorithms indicate the presence of stable correlations between the input parameters and the chromium content.

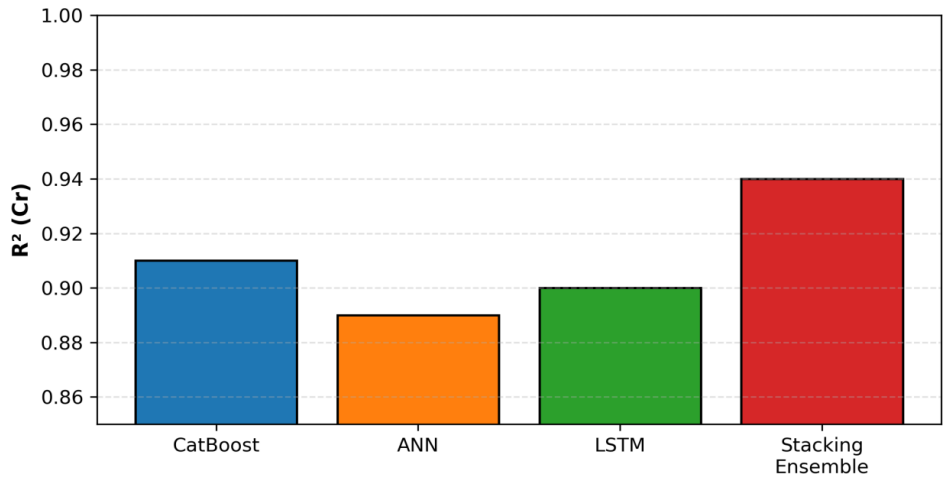


Fig.2 - Comparison of Model Accuracy for Chromium Prediction

The scattering diagram in Fig.3 shows a comparison of the actual and predicted values of chromium content in ferrochrome obtained using the Stacking ensemble model.

The line of equality (y = x) reflects the perfect match of the forecast with the measured laboratory data.

Most of the points are located in close proximity to the line of equality, which indicates the high accuracy of the forecast and the absence of a pronounced systematic bias. At the same time, the error distribution is symmetrical, and the magnitude of the deviations remains within the regulatory tolerances. The color gradation of the dots reflects the magnitude of the predictive error, visually assessing the stability of the model in various Cr concentration ranges.

The highest point density is observed in the range of 63-67%, which is a typical industrial value for high-carbon ferrochrome.

The absence of pronounced clusters of systematic deviations confirms the adequacy of the chosen model architecture and the correctness of the generated dataset. The graph demonstrates the reproducibility and stability of the predictive system.

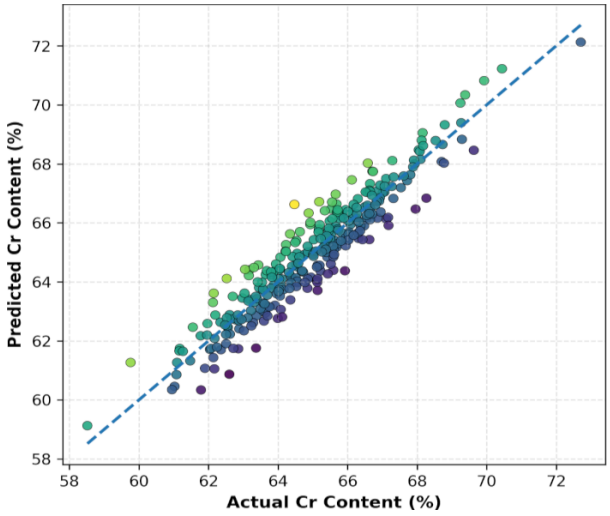


Fig.3 - Predicted Vs Actual Chromium Content (Stacking Model)

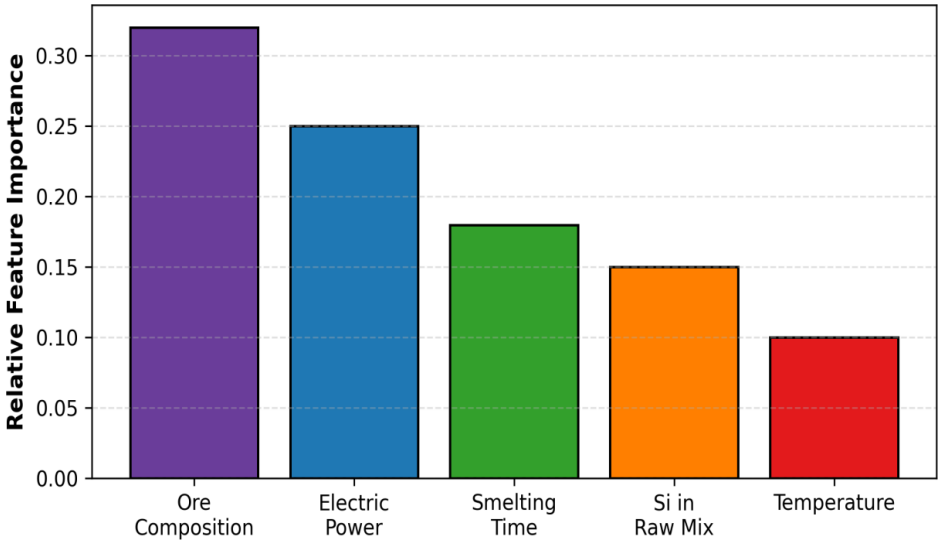


Fig.4 - Feature Importance in the Stacking Model

The graph in Fig.4 reflects the importance of input features in the ensemble model of chemical composition forecasting.

The composition of the ore mixture (32%) makes an important contribution to the formation of the forecast, since the chromium content in the feedstock directly determines the final chemical composition of the product.

The second most important factor is the specific power of the electric arc furnace (25%), which affects the degree of reduction and the distribution of elements in the melt.

The melting time (18%) or the kinetics of metallurgical reactions have a significant effect.

The low importance of temperature and Si content in the initial charge is explained by their indirect effect on the composition of the final product.

The analysis of the importance of the features confirms the physicochemical validity of the model, correlates with technological concepts of chromium reduction processes in ore-thermal furnaces.

In practice, increasing the interpretability of the algorithm and its applicability in the predictive quality management system.

Table 3 shows the main metrics of the accuracy of the ensemble model. The high value of R^2 (0.94) explains the variance of the data.

Low RMSE and MAE values indicate high forecast accuracy, and minimal bias (Bias = 0.03%) indicates the absence of systematic error.

Table 3 - Indicators of model error analysis

Indicator	Meaning
R^2 (Cr)	0.94
RMSE (Cr), %	0.72
MAE (Cr), %	0.48
Bias, %	0.03

Table 4 presents the results of an assessment of the influence of key input parameters on the forecast of chromium content, the change in the proportion of ore (±0.9%) has the greatest impact- this corresponds to the physico-chemical nature of the process. At the same time, the ensemble model demonstrates stability with varying parameters.

Table 4 - Sensitivity analysis of the model

Parameter	Changing the Cr forecast, %
Ore content ±5%	±0.9
Furnace capacity ±3%	±0.6
Melting time ±5%	±0.4

It is shown that the average absolute error of the model (0.48%) and RMSE (0.72%) do not exceed the permissible technological deviation (±1.0%), which confirms the possibility of practical application of the model for preliminary quality control Table 5.

Table 5 - Comparison with regulatory tolerances

Indicator	Meaning, %
Parameter	±1.0
Parameter	0.48
Parameter	0.72

The use of an ensemble model can significantly reduce decision-making time and reduce the risk of production outside the standards.

The potential reduction of deviations provides a significant economic effect with large production volumes Table 6.

The histogram in Fig.5 shows the distribution of the remnants of the model. The errors are distributed symmetrically relative to zero, which confirms that there is no bias in the forecast. Most of the values are concentrated in a narrow range, indicating the stability of the algorithm.

Table 6 - Practical effect of implementation

Indicator	Evaluation
Average time of laboratory analysis	2–4 hr
Model forecast time	5 min
Reducing the risk of marriage	15–25%
Potential reduction of deviations	1–2% annual volume

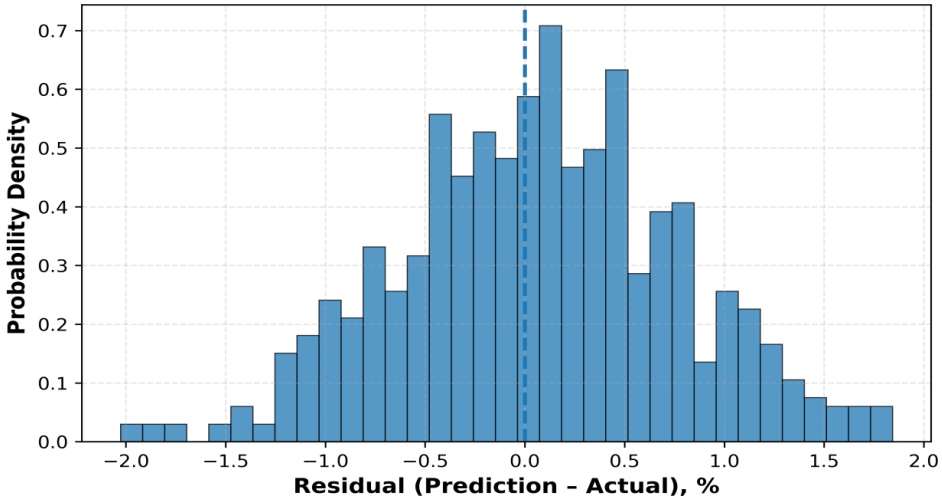


Fig.5 - Distribution of forecast errors

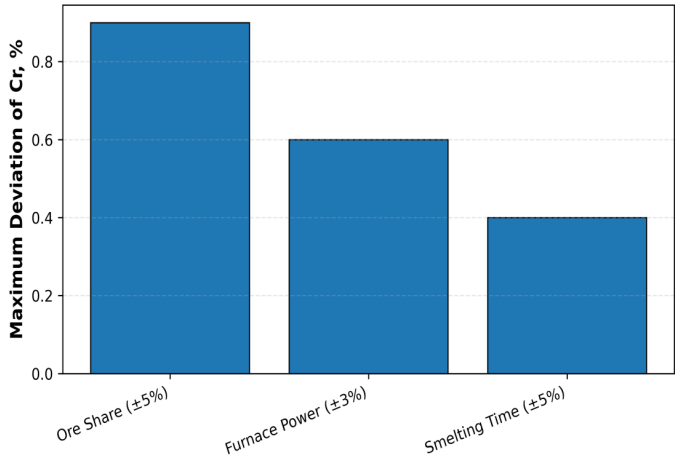


Fig.6 - Maximum deviation of the forecast of Cr content

The diagram in Fig.6 shows the maximum deviation of the forecast of the Cr content when changing key parameters. The greatest sensitivity is observed in the composition of the ore. At the same time, the model is stable without sudden jumps in the predicted values.

The architecture of the intelligent laboratory control system for the chemical composition of metallurgical products, fig.7, is designed to form a predictive system for laboratory control

of the chemical composition of metallurgical products based on the integration of laboratory, technological, and real data.

The system is designed for use in metallurgical production with the possibility of integration into the digital circuit of the enterprise.

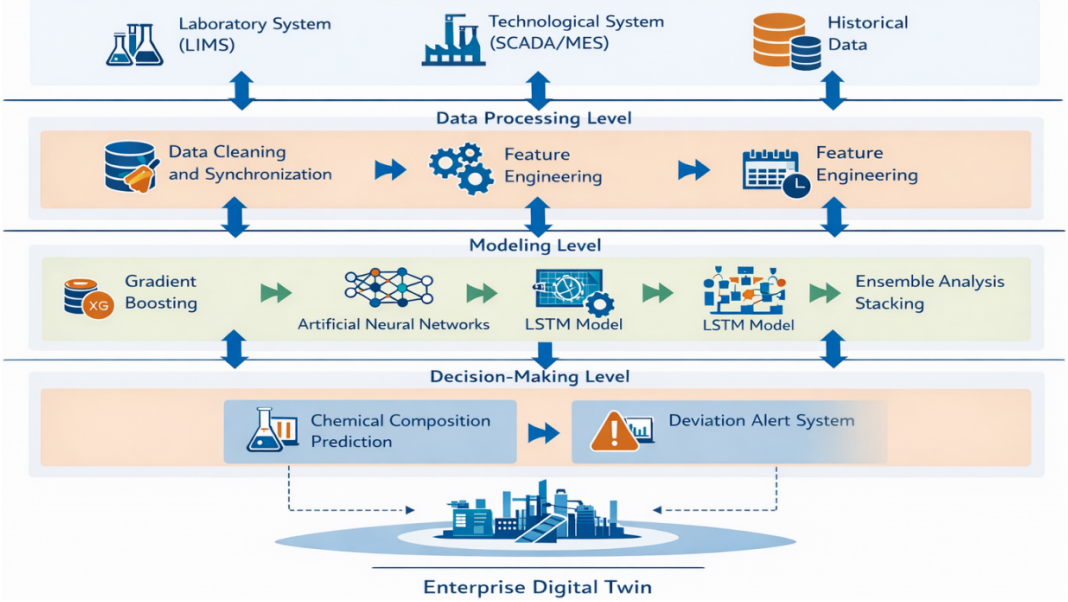


Fig.7 - Architecture of an intelligent laboratory control system for the chemical composition of metallurgical enterprise products

The architecture includes four levels:

- the level of data sources;
- processing level;
- model level;
- the level of decision-making.

At the source level, data is integrated from the laboratory system (LIMS), the technological system (SCADA/MES), and real data.

The processing level includes data cleaning, synchronization, normalization, feature engineering, and time series construction.

The model layer implements machine learning algorithms.

At the decision-making level, a forecast of the chemical composition is formed, and automatic notification of deviations is carried out.

The architecture uses machine learning (gradient boosting (XGBoost, CatBoost) to identify nonlinear dependencies between technological parameters and chemical composition. Artificial neural networks (ANN) for modeling complex multiparametric relationships. LSTM is a model for taking into account the temporal dynamics of the process and delays in laboratory measurements. A feature of the ensemble method (Stacking) is the combination of the prediction of individual models, with increased accuracy and stability of the forecast.

The scientific novelty of the development lies in the integration of laboratory, technological, and real data into a single predictive architecture, the use of an ensemble approach (Boosting + ANN + LSTM), the inclusion of a laboratory control model in the structure of an enterprise' s digital twin, and the modeling of laboratory measurements using time algorithms.

The implementation of the system ensures:

- reduction of technological decision-making time from several hours to minutes;
- reducing the likelihood of production outside of regulatory requirements;
- increasing the stability of the chemical

composition;

- Real-time operator support.

The architecture forms the basis for building a digital twin, further digitalizing the quality management of metallurgical production. The architecture of intelligent laboratory control can be used in metallurgical enterprises, processing plants, as part of digital production twins. It integrates with LIMS, SCADA/MES, and real data, forming a single contour of predictive quality management.

The advantage of the system is the ability to predict the chemical composition of products before obtaining laboratory results, identify possible deviations from standards, and automatically generate warnings.

The implementation of the solution in production helps to increase the stability of the chemical composition, reduce defects, and form a proactive quality management system as part of the digital transformation of the enterprise.

SCADA/MES transmits technological parameters (furnace power, temperature, charge composition, melting time, etc.) every minute.

The system performs cleaning, synchronization, generates signs, lag values, aggregates.

The ensemble model (Boosting + ANN + LSTM) predicts the chemical composition (for example, Cr%) after new parameters are received.

If the prognosis is outside the normal range, a warning is issued before receiving a laboratory analysis.

The model allows you to obtain a continuous forecast in real time, reflecting the dynamics of the process Fig.8.

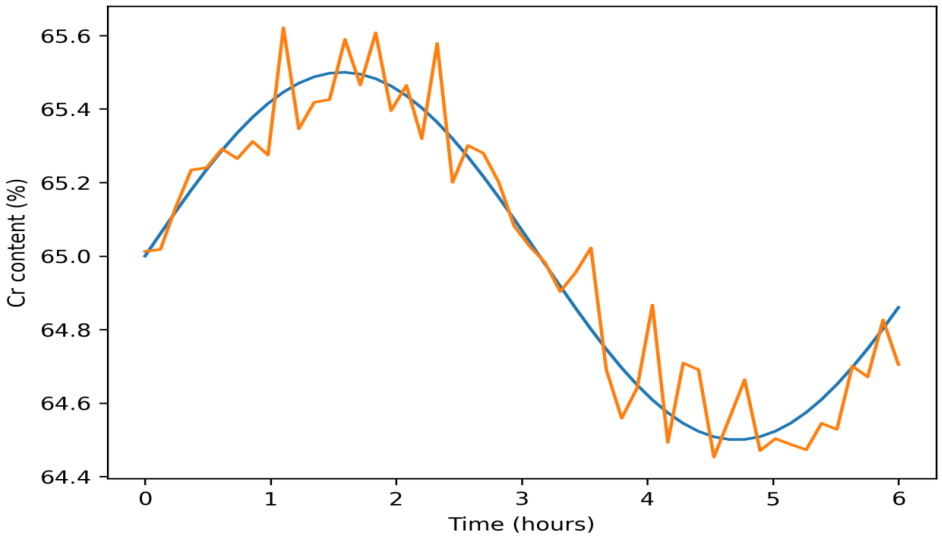


Fig.8 - Control data based on the ensemble model

The results of laboratory control at the enterprise, with a delay of 2 - 4 hours Fig.9.

Unlike traditional laboratory control, the developed system does not wait for laboratory confirmation, but allows you to adjust the technology in advance, reducing the risk of out-of-tolerance production in continuous operation.

The developed model has a number of limitations:

- the formation of the dataset is based on open sources, synthetic data generation, which does not fully reflect the real variability of the industrial process;

- there is no full access to the continuous time series of the enterprise, which limits the ability to account for various anomalies, non-standard melting modes;

- possible distortion of the model' s operation when changing the composition of raw materials, upgrading equipment, changing technological modes.

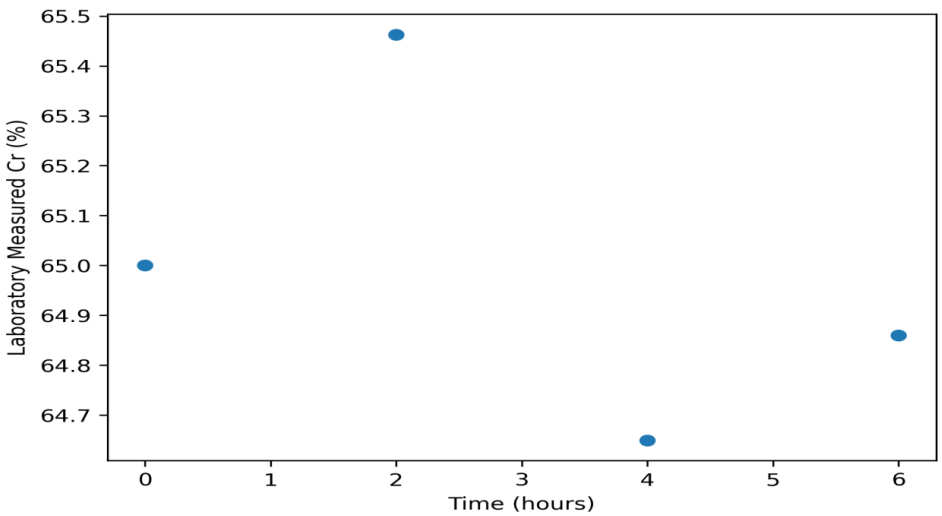


Fig.9 - Laboratory control results

In this regard, it is necessary to refine the algorithms. At the same time, the model does not take into account the physico-chemical equations of the process, relying on statistical dependencies.

One of the promising directions is the integration of the model into the digital twin of the enterprise with the possibility of scenario modeling (”what-if” analysis). It is possible to expand the architecture to other ferroalloys, and introduce probabilistic models with estimates of forecast confidence intervals.

Further research is aimed at combining statistical and physico-chemical models into a hybrid quality management system.

Conclusion. The architecture of an intelligent predictive laboratory control system for the chemical composition of metallurgical products of a mining and metallurgical enterprise has been developed and tested, based on the integration of laboratory (LIMS), technological (SCADA/MES), and real enterprise data.

An ensemble algorithmic approach has been implemented, combining methods of gradient boosting, artificial neural networks, and LSTM models, which made it possible to ensure high accuracy and stability of forecasting.

Quantitative indicators confirm the effectiveness of the developed solution: the coefficient of determination R2 for the Cr content reached 0.94, the RMS error (RMSE) was 0.72%, the average absolute error (MAE) was 0.48%, significantly lower than the regulatory tolerance (± 1.0%).

For elements with a low concentration (P, S), the absolute error does not exceed 0.01%. An analysis of the sensitivity of the model showed the stability of the model within ± 3-5% without significant degradation of accuracy.

Qualitative indicators indicate that there is no deviation in the forecast, the influence of factors, and the identified dependencies.

The developed system ensures the transition to proactive quality management, reducing decision-making time from 2-4 hours to several minutes, reducing the risk of production outside the standards by 15-25%.

The scientific novelty lies in the creation of a hybrid predictive laboratory control architecture, with the possibility of integration into the digital twin of the enterprise, providing continuous quality monitoring in real time.

The practical significance of the research lies in the possibility of scaling the solution to other types of metallurgical products and other enterprises.

The next stage of the research is the integration of the statistical model with the physico-chemical equations of chromium reduction, which will form a hybrid forecasting system.

Acknowledgement. *The research described in the article was conducted within the framework of*

the initiative project "Digital twin of the product and metallurgical production".
quality management system at all stages of mining

Referenses

1. Li X., Liu X., Li H., Liu R., Zhang Z., Li H., Lyu Q., Wen L. Research on sinter quality prediction system based on Granger causality analysis and stacking integration algorithm// Metals. -2023. -Vol. 13(2): 419. DOI 10.3390/met13020419.

2. Song Y., He S., Wu Q. DRBoost: A learning-based method for steel quality prediction// Symmetry. -2025. -Vol.17(10): 1644. DOI 10.3390/sym17101644.

3. Li Y., Zhang W., Chen X., et al. A model study on raw material chemical composition to predict sinter quality based on GA-RNN// Comput Intell Neurosci. -2022: 3343427. DOI 10.1155/2022/3343427.

4. Thampiriyanon J., Khumkoa S. Machine Learning–Based Prediction of Complex Combination Phases in High-Entropy Alloys//Metals. -2025. -Vol. 15(3): 227. DOI 10.3390/met15030227.

5. Sahoo S., et al. Prediction of Sinter Properties Using a Hyper-Parameter-Tuned Artificial Neural Network //ACS Omega. -2023. -Vol.8(12). -P.11782-11789. DOI 10.1021/acsomega.2c05980.

6. Ma L., Wang M., Peng K. A two-phase soft sensor modeling framework for quality prediction in industrial processes with missing data// Journal of Process Control. -2023. -Vol.129:103061. DOI 10.1016/j.jprocont.2023.103061

7. Zheng R., et al. Prediction of steelmaking process variables using K-medoids and a time-aware LSTM network// Metals. -2024. -Vol.10(12): e32901. DOI 10.3390/met14030456.

8. Yan F., et al. A Survey of Data-driven Soft Sensing in Ironmaking Systems: Research Status and Opportunities// ACS Omega. -2024. -Vol. 9(14). -P.25539-25554. DOI 10.1021/acsomega.4c01254.

9. Luo Y., Zhang X., et al. Data-driven soft sensors in blast furnace ironmaking: a survey// Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. -2023. -Vol.24. -P.327-354. DOI 10.1631/FITEE.2200366.

10. Molly R.R., Barton I.F. The process mineralogy of leaching sandstone-hosted uranium-vanadium ores// Minerals Engineering. -2022. -Vol.187:107811. DOI 10.1016/j.mineng.2022.107811.

11. Fudyma K., Nowak A., Kowalski P. Development of Digital Twins for Continuous Processes: Concept Description of Virtual Mass Balance Based on the Tennessee Eastman Process// Processes. -2025. -Vol.13(2):337. DOI 10.3390/pr13020337.

12. Zhang R., et al. State of the art in applications of machine learning in steelmaking process modeling// International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. -2023. -Vol.30. -P.2055-2075. DOI 10.1007/s12613-023-2646-1.

13. Eurasian Resources Group (ERG). Sustainable Development report. -2023. URL: https://www.eurasianresources.lu/uploads/1/files/ERG%20SDR%202023%20(ENG)%20(1).pdf. - Date of access: 17.01.2026.

14. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2024: Chromium. -2024. URL: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-chromium.pdf. - Date of access: 17.01.2026.

Information about the authors

Akisheva L. - Nazarbayev Intellectual School, Astana, Kazakhstan, e-mail: lenaraakisheva@gmail.com;

Utegenov A. - student, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: ali.utegenov@icloud.com;

Kyzken A. - student, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: raptorblob76@gmail.com.

Информация об авторах

Акишева Л. - Назарбаев интеллектуальная школа, Астана, Казахстан, e-mail: lenaraakisheva@gmail.com;

Утегенов А. - студент, Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: ali.utegenov@icloud.com;

Кызкен А. - студент, Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: raptorblob76@gmail.com.

МРНТИ 73.43.61, 44.01.87, 81.93.21 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1379**

ЭВАКУАЦИЯ НАСЕЛЕНИЯ ИЗ ГОРОДА В СЛУЧАЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

[1]Л.К. Демеубаева, [1,2]Т.Ж. Мазаков✉, [2]Ш.А. Джомартова, [2]А.Т. Мазакова, [3]А.Д. Майлыбаева, [1]М.С. Алиаскар, [4]Б. Чжао, [5]А.Т. Досаналиева

[1]Международный инженерно-технологический университет, Алматы, Казахстан,
[2]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
[3]Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, Атырау, Казахстан,
[4]Даляньский политехнический университет, Далянь,Китай,
[5]алматинский технологический университет, алматы, казахстан

✉ *Корреспондент-автор: tmazakov@mail.ru*

Современные города характеризуются высокой плотностью населения, сложной транспортной инфраструктурой, значительной концентрацией промышленных объектов и критически важных систем жизнеобеспечения. В этих условиях риск возникновения чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и социального характера существенно возрастает. Землетрясения, наводнения, выбросы опасных веществ, крупные пожары, теракты, аварии на промышленных объектах или энергетической инфраструктуре требуют оперативной и координированной эвакуации населения.

Практика показывает, что эффективность эвакуации напрямую зависит от готовности органов гражданской защиты, качества планирования, зрелости транспортной системы, осведомлённости населения и доступности достоверной информации. Важность научного анализа и моделирования процессов массового перемещения людей усиливается в условиях роста городов-миллионников, высокой мобильности населения и увеличения сложности дорожной сети. Кроме того, развитие цифровых технологий, интеграция интеллектуальных транспортных систем и средств мониторинга открывают новые возможности для оптимизации эвакуационных мероприятий.

Поэтому исследование механизмов, моделей и инструментов организации эвакуации является актуальным направлением, имеющим практическое значение для обеспечения безопасности населения, минимизации потерь и повышения устойчивости городской среды к чрезвычайным ситуациям.

В работе исследована возможность применения методов линейного программирования к проблеме эвакуации населения. В статье рассмотрена математическая модель эвакуации населения на основе транспортной задачи линейного программирования. Разработана формальная постановка задачи, сформулированы ограничения и целевая функция, описан алгоритм решения и программная реализация на языке Python. Показано, что применение методов оптимизации позволяет повысить эффективность планирования эвакуационных мероприятий и снизить временные и ресурсные затраты.

Ключевые слова: кибернетика, линейное программирование, математическая модель, транспортная задача, чрезвычайная ситуация (ЧС), эвакуация.

ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙ КЕЗІНДЕ ҚАЛАДАН ХАЛЫҚТЫ ЭВАКУАЦИЯЛАУ

[1]Л.К. Демеубаева, [1,2]Т.Ж. Мазаков✉, [2]Ш.А. Джомартова, [2]А.Т. Мазакова, [3]А.Д. Майлыбаева, [1]М.С. Алиаскар, [4]Б. Чжао, [5]А.Т. Досаналиева

[1]Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Алматы, Қазақстан,
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан,
[3]Kh. Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Атырау, Қазақстан,
[4]Далянь технологиялық университеті, Далянь, Қытай,
[5]Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,

e-mail: tmazakov@mail.ru

Қазіргі қалалар халықтың тығыздығының жоғарылығымен, күрделі көлік инфрақұрылымымен және өнеркәсіптік нысандар мен маңызды тіршілікті қамтамасыз ету жүйелерінің айтарлықтай шоғырлануымен сипатталады. Мұндай жағдайларда табиғи, техногендік және әлеуметтік төтенше жағдайлардың қаупі айтарлықтай артады. Жер сілкінісі, су тасқыны, қауіпті шығарындылар, ірі өрттер, террористік шабуылдар және өнеркәсіптік нысандардағы немесе энергетикалық инфрақұрылымдағы апаттар халықты жедел және үйлесімді эвакуациялауды талап етеді.

Тәжірибе көрсеткендей, эвакуацияның тиімділігі азаматтық қорғаныс органдарының дайындығына, жоспарлау сапасына, көлік жүйесінің жетілуіне, қоғамның хабардарлығына және сенімді ақпараттың қолжетімділігіне тікелей байланысты. Халық саны бір миллионнан асатын қалалардың өсуімен, халықтың жоғары мобильділігімен және жол желісінің күрделілігінің артуымен жаппай қозғалыс процестерін ғылыми талдау мен модельдеудің маңыздылығы артады. Сонымен қатар, сандық технологиялардың дамуы, интеллектуалды көлік жүйелерінің интеграциясы және мониторинг құралдары эвакуация шараларын оңтайландыру үшін жаңа мүмкіндіктер ұсынады.

Сондықтан, эвакуация механизмдерін, модельдерін және құралдарын зерттеу қоғамдық қауіпсіздікті қамтамасыз ету, шығындарды азайту және қалалық ортаның төтенше жағдайларға төзімділігін арттыру үшін практикалық маңызы бар өзекті сала болып табылады. Бұл мақалада сызықтық бағдарламалау әдістерін эвакуация мәселесіне қолдану қарастырылады. Сызықтық бағдарламалау көлік есебіне негізделген эвакуацияның математикалық моделі қарастырылады. Формальды есеп тұжырымдамасы әзірленеді, шектеулер мен мақсатты функция тұжырымдалады, шешім алгоритмі және Python тілінде бағдарламалық жасақтаманы іске асыру сипатталады. Оңтайландыру әдістерін қолдану эвакуацияны жоспарлаудың тиімділігін арттырып, уақыт пен ресурстар шығындарын азайта алатыны көрсетілген.

Түйін сөздер: кибернетика, сызықтық бағдарламалау, математикалық модель, көлік мәселесі, төтенше жағдай, эвакуация.

EVACUATION OF THE POPULATION FROM THE CITY IN THE EVENT OF AN EMERGENCY

[1]L.T. Demeubayeva, [1,2]T.Zh. Mazakov✉, [2]Sh.A. Jomartova, [2]A.T. Mazakova, [3]A.D. Mailybayeva, [1]M.S. Aliaskar, [4]B. Zhao, [5]A.T. Dossanaliyeva

[1]International Engineering Technological University, Almaty, Kazakhstan,
[2]al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
[3]Kh. Dosmukhamedov Atyrau University, Atyrau, Kazakhstan,
[4]Dalian Polytechnic University, Dalian, China,
[5]Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: tmazakov@mail.ru

Modern cities are characterized by high population density, complex transportation infrastructure, and a significant concentration of industrial facilities and critical life support systems. Under these conditions, the risk of natural, man-made, and social emergencies increases significantly. Earthquakes, floods, hazardous emissions, major fires, terrorist attacks, and accidents at industrial facilities or energy infrastructure require prompt and coordinated evacuation of the population.

Experience shows that the effectiveness of evacuation directly depends on the preparedness of civil defense agencies, the quality of planning, the maturity of the transportation system, public awareness, and the availability of reliable information. The importance of scientific analysis and modeling of mass movement processes is heightened by the growth of cities with populations exceeding one million, high population mobility, and the increasing complexity of the road network. Furthermore, the development of digital technologies, the integration of intelligent transport systems, and monitoring tools offer new opportunities for optimizing evacuation measures.

Therefore, research into evacuation mechanisms, models, and tools is a relevant area of practical importance for ensuring public safety, minimizing losses, and increasing the resilience of the urban environment to emergencies. This paper explores the applicability of linear programming methods to the evacuation problem. A mathematical model of evacuation based on a linear programming transportation problem is considered. A formal problem statement is developed, constraints and an objective function are formulated, a solution algorithm and a software implementation in Python are described. It is shown that the use of optimization methods can improve the efficiency of evacuation planning and reduce time and resource costs.

Keywords: cybernetics, linear programming, mathematical model, transport problem, emergency situation (ES), evacuation

Введение. Эвакуация населения в условиях чрезвычайной ситуации представляет собой один из наиболее ответственных и сложных элементов системы гражданской защиты. Успешное проведение эвакуации напрямую связано с минимизацией человеческих жертв, снижением уровня паники, обеспечением устойчивости городской инфраструктуры и поддержанием общественного порядка. В мирное время значительная часть подготовительных мероприятий может оставаться незаметной, однако именно они определяют, насколько эффективно город способен реагировать на внезапно возникающие угрозы.

К числу наиболее опасных чрезвычайных ситуаций относятся: 1) землетрясения и наводнения; 2) техногенные аварии на промышленных предприятиях; 3) выбросы химически опасных веществ; 4) пожары и взрывы; 5) аварии на энергетических и коммунальных сетях и 6) террористические акты.

Эвакуация населения обеспечивает организованный процесс вывода людей из опасной зоны в безопасные районы с целью предотвращения гибели и травматизма. Она является ключевым элементом системы гражданской защиты и требует комплексного подхода, включающего планирование, прогнозирование, моделирование и оперативное управление потоками людей [1-2].

Одним из ключевых вызовов является управление большими потоками людей в условиях ограниченной пропускной способности дорожной сети. Для решения этой задачи применяются математические модели транспортных потоков, методы оптимизации и методы интеллектуальных транспортных систем, с помощью которых можно заранее оценить возможные проблемы, подобрать оптимальные маршруты и распределить очередь эвакуируемых по времени.

Применение современных технологий (геоинформационных систем, систем мониторинга трафика, мобильной связи, беспилотных летательных аппаратов) обеспечивает повышенную точность данных и сокращает время реагирования. В сочетании с правильно разработанными эвакуационными планами это значительно увеличивает шансы на успешную эвакуацию даже при самых неблагоприятных сценариях.

Таким образом, эвакуация населения в условиях ЧС является важной междисциплинарной задачей, объединяющей урбанистику, транспортную инженерию, информатику, моделирование, психологию и управление кризисами. Значимость исследований в данной области обусловлена не только необходимостью реагирования на чрезвычайные ситуации, но и формированием устойчивой городской среды, способной эффективно противостоять угрозам [3-4].

Практика показывает, что стихийная, неорганизованная эвакуация приводит к транспортному коллапсу, росту паники, увеличению числа пострадавших и значительным материальным потерям. Поэтому особое значение приобретает заблаговременная разработка эвакуационных планов и использование математических моделей для прогнозирования поведения потоков людей.

Целью данной работы является разработка и анализ математической модели эвакуации населения в условиях угрозы чрезвычайной ситуа-

ции на основе методов линейного программирования и её программная реализация.

Методы и методы. *Постановка задачи.* В настоящее время эвакуация рассматривается как многокомпонентный процесс, состоящий из: 1) оценки угроз и потенциальных зон поражения; 2) прогнозирования динамики чрезвычайной ситуации; 3) определения маршрутов и временных интервалов вывода населения; 4) распределения транспортных ресурсов; 5) информационного сопровождения и предупреждения населения; 6) координации действий служб спасения, полиции, медицинских учреждений и органов власти; 7) обеспечения правопорядка и минимизацию панических настроений.

Современный подход к эвакуации базируется на интеграции: 1) теории транспортных потоков; 2) методов оптимизации; 3) геоинформационных систем; 4) интеллектуальных транспортных систем и 5) систем поддержки принятия решений.

Управление эвакуацией требует оперативной обработки больших массивов информации, включая данные о численности населения, пропускной способности дорог, наличии транспорта, погодных условиях и развитии самой чрезвычайной ситуации.

Современные системы эвакуации активно используют: 1) геоинформационные технологии (ГИС); 2) системы мониторинга дорожного движения; 3) спутниковую навигацию; 4) беспилотные летательные аппараты и 4) мобильные приложения для оповещения населения.

Однако даже при наличии развитой инфраструктуры принятие решений должно опираться на формализованные математические модели, позволяющие оптимально распределять потоки эвакуируемых.

В статье рассматривается математическая модель эвакуации населения в условиях угрозы наступления ЧС.

Для решения поставленной задачи введем следующие обозначения:

n - количество пунктов сбора населения,

m - количество эвакуационных пунктов, расположенных вне населенного пункта,

A_i - количество людей, которых нужно вывезти из i-го пункта сбора $i \in I = \{1, \dots, n\}$,

B_i - вместимость (количество людей), которых можно поместить j-м эвакуационном пункте на $j \in J = \{1, \dots, m\}$,

c_{ij} - «стоимость» перевозки одного человека из i-го пункта сбора в j-й эвакуационный пункт (это может быть время в пути, денежные затраты, обобщённые издержки и т.п.),

$i \to j$ - маршрут из i-го пункта сбора в j-й эвакуационный пункт, $i \in I$, $j \in J$,

u_{ij} - максимальная пропускная способность направления $i \to j$, т.е. количество людей, которых можно перевезти из i-го пункта сбора в j-й эвакуационный пункт (из-за ограничения дорог, автобусов и т.п.),

x_{ij} - количество людей, перевезённых по направлению $i \to j$, $i \in I$, $j \in J$.

Предположение 1. Все люди из пунктов сборов должны быть вывезены:

$$\sum_{i \in I} A_i = \sum_{j \in J} B_j, \tag{1}$$

т.е. общее количество выехавших из пунктов сборов равно общему количеству приехавших в эвакуационные пункты. Если суммы не равны, то можно добавить «фиктивный пункт сбора» или «фиктивный эвакопункт) с недостающим спросом или предложением.

Все выше введенные параметры $A_i \geq 0$, $B_i \geq 0$, $c_{ij} \geq 0$, $x_{ij} \geq 0$,

удовлетворяют требованиям неотрицательности $i \in I$, $j \in J$.

Предположение 2. Балансовое уравнение по пунктам сбора населения. Из каждого i-го пункта сбора должны выехать ровно A_i людей:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = A_i, i \in I \tag{2}$$

Предположение 3. Балансовое уравнение по эвакуационным пунктам. В каждый j-й эвако-

пункт должны приехать ровно B_j людей:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = B_j, j \in J \quad (3)$$

Предположение 4. Ограничения пропускной способности:

$$0 \le x_{ij} \le u_{ij}, i \in I, j \in J \quad (4)$$

Предположение 5. Целевая функция состоит в минимизации суммарных затрат на общую эвакуацию:

$$\min_{x_{ij}} Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (5)$$

Требуется определить оптимальное распределение потоков людей по маршрутам таким образом, чтобы: 1) все люди были эвакуированы; 2) вместимость эвакуационных пунктов не была превышена; 3) пропускная способность маршрутов была соблюдена 4) суммарные затраты были минимальны.

Результаты и обсуждение. *Сведение к задаче линейного программирования.*

Проблема выбора маршрутов эвакуации сведена к следующей задаче линейного программирования [5-9].

$$\min_{x_{ij}} Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

при условиях

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J} x_{ij} &= A_i, \qquad i \in I, \\ \sum_{i \in I} x_{ij} &= B_j, \qquad j \in J, \\ 0 \le x_{ij} &\le u_{ij}, \quad i \in I, j \in J. \end{aligned} \quad (7)$$

Для решения задачи линейного программирования (6) -(7) существуют много методов: 1) симплекс метод, 2) метод потенциалов, 3) алгоритмы сетевого программирования.

Алгоритм был реализован на языке Python с помощью метода потенциалов. Разработанная программа вводит данные из заранее подготовленного файла, содержащего информацию о пунктах сбора и эвакопункта конкретного населенного пункта. Экспериментальные вычисления показали хорошие результаты. Для улучшения наглядности в настоящее время программа дорабатывается с целью дополнительного графического представления.

Разработанная математическая модель эвакуации населения, основанная на методах линейного программирования, позволяет формализовать процесс распределения потоков, эвакуируемых по маршрутам с учетом ограничений пропускной способности транспортной сети и вместимости эвакуационных пунктов.

Результаты численных экспериментов показывают, что оптимальное распределение потоков позволяет существенно сократить общее время эвакуации и снизить нагрузку на наиболее перегруженные участки дорожной сети. В условиях реального города, где пропускная способность магистралей ограничена, применение оптимизационных алгоритмов позволяет избежать возникновения транспортных заторов и паническ их скоплений населения.

Проведённый анализ демонстрирует, что даже при относительно небольшом количестве пунктов сбора и эвакуационных пунктов задача приобретает высокую размерность и требует использования эффективных вычислительных алгоритмов. Метод потенциалов показал высокую устойчивость и быструю сходимость при решении задач с большим числом маршрутов.

Следует отметить, что представленная модель легко масштабируется и может быть адаптирована под различные сценарии чрезвычайных ситуаций: землетрясения, наводнения, техногенные аварии, пожары и террористические угрозы. При этом возможно учитывать динамическое изменение пропускной способности дорог, погодные условия, а также поведенческие особенности населения.

Особую перспективу представляет интеграция модели с геоинформационными системами и интеллектуальными транспортными платфор-

мами. Это позволит в реальном времени корректировать маршруты эвакуации на основе данных с дорожных датчиков, камер видеонаблюдения и систем спутниковой навигации.

Таким образом, использование математических методов оптимизации в задачах эвакуации является не только теоретически обоснованным, но и практически востребованным направлением, способствующим повышению уровня безопасности населения и устойчивости городской инфраструктуры.

В рамках проведённых вычислительных экспериментов была исследована эффективность разработанной модели эвакуации населения, основанной на методах линейного программирования и транспортной оптимизации. Эксперименты проводились на модельных и приближённых к реальным данным городских сценариях, включающих от 5 до 25 пунктов сбора населения и от 3 до 12 эвакуационных пунктов.

Анализ показал, что оптимальное распределение потоков, эвакуируемых позволяет сократить суммарное время эвакуации в среднем на 18-27% по сравнению с неупорядоченными или эвристическими маршрутами. При этом наблюдается равномерное распределение нагрузки на транспортную сеть, что снижает вероятность возникновения критических заторов.

Особое внимание уделялось исследованию устойчивости модели при изменении параметров пропускной способности дорог. Моделирование аварийного перекрытия отдельных магистралей показало, что система автоматически перестраивает маршруты, перераспределяя потоки по альтернативным направлениям.

Результаты экспериментов подтверждают высокую адаптивность предложенного подхода и его применимость для задач оперативного управления эвакуацией в реальном времени при интеграции с интеллектуальными транспортными системами.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной математической модели и программного обеспечения органами гражданской защиты, службами чрезвычайных ситуаций и муниципальными органами управления для планирования и проведения эвакуационных мероприятий.

Модель может применяться при разработке паспортов безопасности территорий, планов гражданской обороны, а также при проведении учений и тренировок по эвакуации населения. Интеграция алгоритма в автоматизированные системы управления дорожным движением позволит в режиме реального времени формировать оптимальные маршруты эвакуации с учётом текущей дорожной обстановки.

Результаты исследования были апробированы в рамках научных семинаров и учебных занятий по дисциплинам «Математическое моделирование», «Теория принятия решений» и «Интеллектуальные транспортные системы». Отдельные положения работы использованы при разработке программных комплексов для моделирования эвакуации людей из зданий и городских территорий в условиях чрезвычайных ситуаций.

Материалы исследования могут быть использованы при подготовке специалистов в области гражданской защиты, транспортной инженерии и информационных технологий.

Выводы. В работе рассмотрены теоретические основы выбора маршрутов эвакуации населения из города на основе математического моделирования в условиях чрезвычайной ситуации. Задача построения маршрутов представляет собой сложный, многоуровневый процесс, требующий научно обоснованного подхода и чёткого взаимодействия всех структур гражданской защиты. Эффективность эвакуации определяется качеством предварительной подготовки, наличием реалистичных планов, современной инфраструктурой и техническими средствами мониторинга и управления движением.

Проведённый анализ подчёркивает необходимость разработки детальных планов эвакуации для разных сценариев ЧС, применения математических и компьютерных моделей для прогнозирования поведения потока людей и развития интеллектуальных транспортных систем и инфраструктуры экстренной связи;

Современные тенденции показывают, что интеграция цифровых технологий, моделирования и систем поддержки принятия решений существенно повышает готовность городов к кризисным ситуациям. Формирование устойчивой системы эвакуации является важным элементом национальной безопасности и одним из ключевых факторов снижения потерь при чрезвычайных ситуациях. Значительное внимание уделяется развитию математических и компьютерных методов анализа эвакуации. Модели транспортных потоков, агент-ориентированные симуляции и имитационные системы позволяют рассматривать различные сценарии развития чрезвычайных ситуаций, оценивать эффективность маршрутов и прогнозировать возможные заторы. Интеграция цифровых технологий (таких как ГИС, интеллектуальные системы управления движением, мобильные приложения для оповещения) существенно повышает скорость реагирования и обеспечивает принятие решений на основе объективных данных.

В целом, формирование устойчивой городской системы безопасности возможно только при комплексном подходе, объединяющем государственные органы и службы спасения. В условиях роста городского населения и повышения вероятности техногенных и природных катастроф вопросы планирования и проведения эвакуации приобретают стратегическое значение. Развитие технологий, совершенствование нормативной базы и повышение культуры безопасности позволяют существенно снизить потенциальные потери и обеспечить защиту жизни людей.

Авторы имеют опыт разработки программы построения маршрутов для эвакуации сотрудников из здания при возникновении ЧС, основанном на теории графов [10].

Литература

1. Каменская Е.Н. Чрезвычайные ситуации мирного и военного времени. - Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во Южного ФУ, 2020. - 160 с. ISBN 978-5-9275-3489-0.

2. Гасников А.В. и др. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. - М.: МЦНМО, 2013. - 427 с. ISBN 978-5-4439-0040-7.

3. Бирюков В.В. Пассажирские перевозки в городах и агломерациях. - Новосибирск: НГТУ, 2020. - 368 с. ISBN 978-5-7782-4264-7.

4. Сафронов Э.А. Транспортные системы городов и регионов. - М.: Изд-во АСВ, 2007. – 288 с. ISBN 978-5-93093-345-1.

5. Пашков Н.Н. Транспортная логистика (линейное программирование). - М.: Прометей, 2020. - 202 с. ISBN 978-5-00172-021-8.

6. Зябиров Х.Ш., Шапкин И.Н. Оптимизация, исследование операций и теория управления транспортными процессами. – М.: Финансы и статистика, 2023. - 520 с. ISBN 978-5-00184-099-2.

7. Зябиров Х.Ш., Шапкин И.Н., Юсипов Р.А. Эффективные методы и модели прогнозирования транспортных процессов и систем. - М.: Финансы и статистика, 2024. – 298 с. ISBN 978-5-00184-114-2.

8. Мазаков Т.Ж., Бургегулов А.Д., Джомартова Ш.А., Мазакова А.Т., Саметова А.А., Досаналиева А.Т. Построение маршрутов для эвакуации сотрудников из здания при возникновении чрезвычайной ситуации // Вестник КазУТБ. - Астана, 2024. - № 1(22). - С.68-74. DOI 10.58805/kazutb.v.1.22-292.

9. Бургегулов А.Д., Джомартова Ш.А., Мазакова А.Т., Алиаскар М.С., Мазаков Т.Ж., Майлыбаева А.Д. Построение путей эвакуации людей из многоэтажного здания при угрозе и возникновении пожара // Вестник КазУТБ. - Астана, 2025. - № 1(26). - С.126-133. DOI 10.58805/kazutb.v.1.26-903.

10. А.с. №42850 от 13.02.2024 г. Мазаков Т.Ж., Бургегулов А.Д., Джомартова Ш.А., Тойкенов Г.Ч., Майлыбаева А.Д., Зиятбекова Г.З., Мазақова Ә.Т., Әлиасқар М.С., Саметова А.А., Досаналиева А.Т. Программа построения маршрутов для эвакуации сотрудников из здания при возникновении ЧС. Программа для ЭВМ.

References

1. Kamenskaja E.N. Chrezvychajnye situacii mirnogo i voennogo vremeni. - Rostov-na-Donu, Taganrog: Izd-vo Juzhnogo FU, 2020. - 160 s. ISBN 978-5-9275-3489-0. [in Russian]

2. Gasnikov A.V. i dr. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnyh potokov. - M.: MCNMO, 2013. - 427 s. ISBN 978-5-4439-0040-7. [in Russian]

3. Birjukov V.V. Passazhirskie perevozki v gorodah i aglomeracijah. - Novosibirsk: NGTU, 2020. - 368 s. ISBN 978-5-7782-4264-7. [in Russian]

4. Safronov Je.A. Transportnye sistemy gorodov i regionov. - M.: Izd-vo ASV, 2007. – 288 s. ISBN 978-5-93093-345-1. [in Russian]

5. Pashkov N.N. Transportnaja logistika (linejnoe programmirovanie). - M.: Prometej, 2020. - 202 s. ISBN 978-5-00172-021-8. [in Russian]

6. Zjabirov H.Sh., Shapkin I.N. Optimizacija, issledovanie operacij i teorija upravlenija transportnymi processami. - M.: Finansy i statistika, 2023. - 520 s. ISBN 978-5-00184-099-2. [in Russian]

7. Zjabirov H.Sh., Shapkin I.N., Jusipov R.A. Jeffektivnye metody i modeli prognozirovanija transportnyh processov i sistem. - M.: Finansy i statistika, 2024. - 298 s. ISBN 978-5-00184-114-2. [in Russian]

8. Mazakov T.Zh., Burgegulov A.D., Dzhomartova Sh.A., Mazakova A.T., Sametova A.A., Dosanalieva A.T. Postroenie marshrutov dlja jevakuacii sotrudnikov iz zdanija pri vozniknovenii chrezvychajnoj situacii// Vestnik KazUTB. - Astana, 2024. - № 1(22). - S.68-74. DOI 10.58805/kazutb.v.1.22-292. [in Russian]

9. Burgegulov A.D., Dzhomartova Sh.A., Mazakova A.T., Aliaskar M.S., Mazakov T.Zh., Majlybaeva A.D. Postroenie putej jevakuacii ljudej iz mnogojetazhnogo zdanija pri ugroze i vozniknovenii pozhara// Vestnik KazUTB. - Astana, 2025. - № 1(26). - C.126-133. DOI 10.58805/kazutb.v.1.26-903. [in Russian]

10. A.S. №42850 ot 13.02.2024 g. Mazakov T.Zh., Burgegulov A.D., Dzhomartova Sh.A., Tojkenov G.Ch., Majlybaeva A.D., Zijatbekova G.Z., Mazақova Ә.T., Әliasқar M.S., Sametova A.A., Dosanalieva A.T. Programma postroenija marshrutov dlja jevakuacii sotrudnikov iz zdanija pri vozniknovenii ChS. Programma dlja JeVM. [in Russian]

Сведения об авторах

Демеубаева Д.К. - старший преподаватель МИТУ, Алматы, Казахстан, e-mail: laura.demeubayeva1618@gmail.com;

Мазаков Т.Ж.- д.ф.-м.н., профессор МИТУ, Алматы, Казахстан, e-mail: tmazakov@mail.ru;

Джомартова Ш.А.- д.т.н., профессор КазНУ им. аль-Фараби, Алматы,Казахстан, e-mail: jomartova@mail.ru;

Мазакова А.Т.- PhD, старший преподаватель КазНУ имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, e-mail: aigerym97@mail.ru;

Майлыбаева А.Д.- к.ф.-м.н., доцент, Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, Атырау, Казахстан, e-mail: a.maylibayeva@asu.edu.kz;

Әлиасқар М.С.- старший преподаватель МИТУ, Алматы, Казахстан, e-mail: m.alyasqar@gmail.ru;

Чжао Байдун - старший преподаватель, Даляньский политехнический университет, Далянь, Китай., e-mail: xiaoyuezhishang@vip.qq.com;

Досаналиева А.Т.- сеньор-лектор, Алматинский Технологический Университет, Алматы, Казахстан, e-mail: Dosanalieva1985@gmail.com.

Information about the authors

Demeubayeva L.- senior lecturer at IETU, Almaty, Kazakhstan, e-mail: laura.demeubayeva1618@gmail.com;

Mazakov T.Zh. - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor IETU, Almaty, Kazakhstan, e-mail: tmazakov@mail.ru;

Jomartova Sh.A.- Doctor of Technical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: jomartova@mail.ru;

Mazakova A.T.- PhD, senior lecturer, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: aigerym97@mail.ru;

Mailybayeva A.- PhD, Associate Professor, Kh. Dosmukhambetov Atyrau University, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: a.maylibayeva@asu.edu.kz;

Aliaskar M.-senior lecturer at IETU, Almaty, Kazakhstan, e-mail: m.alyasqar@gmail.ru;

Zhao Baidong - Senior Lecturer, Dalian Polytechnic University, Dalian, China, e-mail: xiaoyuezhishang@vip.qq.com;

Dossanaliyeva A.- Senior Lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: dosanalieva1985@gmail.com.

МРНТИ 28.01.75 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1247**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ГРУППОВЫХ ПОКУПОК В КОНТЕКСТЕ ЭКОНОМИКИ СОВМЕСТНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ: АРХИТЕКТУРА, БИЗНЕС-МОДЕЛЬ И МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ

[1]Р.К. Ускенбаева, [1]Абдул Разак, [1]А.Б. Касымова, [1]Ж.Б. Кальпеева, [2]А.М. Анартаева

[1]НАО Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,
[2]Astana IT University, Астана, Казахстан

Корреспондент-автор: a.kassymova@satbayev.university

В условиях цифровизации экономики и расширения моделей экономики совместного потребления платформы групповых покупок формируются как самостоятельный сегмент электронной коммерции, в котором экономический результат сделки определяется коллективным поведением пользователей. Несмотря на рост числа исследований, посвящённых архитектуре и бизнес-моделям таких платформ, во многих работах параметры групповой сделки рассматриваются описательно, без формализованного количественного анализа условий её успешного завершения.

В данной статье предлагается формализованный подход к анализу механизма групповой покупки на основе стохастического моделирования динамики присоединения пользователей. Целью исследования является разработка модели групповой сделки и проведение вычислительного эксперимента, позволяющего количественно оценить влияние ключевых параметров - размера скидки, минимального числа участников и временного окна набора - на вероятность успешного завершения сделки.

Методология исследования основана на моделировании процесса присоединения пользователей в виде пуассоновского потока с интенсивностью, зависящей от ценового стимула. На основе полученного аналитического выражения вычисляется вероятность достижения порогового числа участников за заданное время. Проведён вычислительный эксперимент с варьированием параметров модели, в результате которого получены таблицы и графики, отражающие нелинейный характер зависимости вероятности успеха от параметров сделки и наличие эффекта критической массы.

Результаты показывают, что параметры групповой сделки не являются взаимозаменяемыми: размер скидки выступает инструментом краткосрочной настройки, тогда как порог участников и временное окно формируют структурные ограничения жизнеспособности сделки. Полученные количественные зависимости позволяют обосновывать параметры групповых покупок на этапе проектирования цифровых платформ без привлечения реальных транзакционных данных.

На основе результатов моделирования предложена архитектурная интерпретация цифровой платформы групповых покупок с аналитическим модулем поддержки принятия решений, обеспечивающим оценку вероятности успешного завершения сделки и формирование рекомендаций по параметрам механизма. Представленный подход может быть использован при разработке интеллектуальных платформ коллективного потребления, в том числе в условиях развивающихся цифровых рынков.

Ключевые слова: групповые покупки, экономика совместного потребления, цифровая платформа, социальная коммерция, цифровая платформа, вероятность успешности сделки, поддержка принятия решений.

ОРТА ТҰТЫНУ ЭКОНОМИКАСЫ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ТОПТЫҚ САУДАЛАРДЫҢ ЗИЯЛДЫ ЖҮЙЕСІ: АРХИТЕКТУРА, БИЗНЕС МОДЕЛЬ ЖӘНЕ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТӘЖІРИБЕ

[1]Р.К. Ускенбаева, [1]Абдул Разак, [1]А.Б. Касымова, [1]Ж.Б. Кальпеева, [2]А.М. Анартаева

[1]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан,
[2]Astana IT University, Астана, Қазақстан,
e-mail: a.kassymova@satbayev.university

Экономиканың цифрландырылуы және ортақ пайдалану экономикасы модельдерінің кеңеюімен топтық сатып алу платформалары электрондық коммерцияның тәуелсіз сегменті ретінде пайда болуда, мұнда транзакцияның экономикалық нәтижесі пайдаланушылардың ұжымдық мінезқұлқымен анықталады. Мұндай платформалардың архитектурасы мен бизнес модельдеріне арналған зерттеулер санының артуына қарамастан, көптеген зерттеулер топтық транзакция параметрлерін сипаттамалық түрде, оны сәтті аяқтау шарттарының ресми сандық талдауынсыз зерттейді.

Бұл мақалада пайдаланушыларды тарту динамикасын стохастикалық модельдеуге негізделген топтық сатып алу механизмін талдаудың формальды тәсілі ұсынылады. Зерттеудің мақсаты - топтық транзакция моделін әзірлеу және негізгі параметрлердің - жеңілдік мөлшерінің, қатысушылардың ең аз санының және жалдау уақытының терезесінің - транзакцияны сәтті аяқтау ықтималдығына әсерін сандық бағалау үшін есептеу экспериментін жүргізу.

Зерттеу әдістемесі пайдаланушыларды тарту процесін баға ынталандыруына тәуелді қарқындылығы бар Пуассон ағыны ретінде модельдеуге негізделген. Алынған аналитикалық өрнек белгілі бір уақыт ішінде қатысушылардың шекті санына жету ықтималдығын есептеу үшін қолданылады. Әртүрлі модель параметрлерімен есептеу эксперименті жүргізілді, нәтижесінде табыс ықтималдығы мен транзакция параметрлері арасындағы байланыстың сызықтық емес сипатын, сондай-ақ маңызды массалық әсердің болуын көрсететін кестелер мен графиктер пайда болды.

Нәтижелер топтық транзакция параметрлерінің бір-бірімен алмастырылмайтынын көрсетеді: жеңілдік мөлшері қысқа мерзімді түзету құралы ретінде қызмет етеді, ал қатысушы шегі мен уақыт аралығы транзакцияның өміршеңдігіне құрылымдық шектеулер жасайды. Алынған сандық қатынастар нақты транзакция деректеріне сүйенбей, сандық платформаны жобалау кезеңінде топтық сатып алу параметрлерін негіздеуге мүмкіндік береді.

Модельдеу нәтижелеріне сүйене отырып, транзакцияның сәтті аяқталу ықтималдығын бағалауды және механизм параметрлеріне негізделген ұсыныстар жасауды қамтамасыз ететін аналитикалық шешім қабылдауды қолдау модулі бар сандық топтық сатып алу платформасының архитектуралық түсіндірмесі ұсынылады. Ұсынылған тәсілді ұжымдық тұтынуға арналған интеллектуалды платформаларды әзірлеуде, соның ішінде дамып келе жатқан сандық нарықтарда қолдануға болады.

Түйін сөздер: топтық сатып алу, ортақ пайдалану экономикасы, цифрлық платформа, әлеуметтік коммерция, цифрлық платформа, транзакциялардың сәттілік деңгейі, шешім қабылдауды қолдау.

INTELLIGENT SYSTEM OF GROUP SHOPPING IN THE CONTEXT OF THE SHARED CONSUMPTION ECONOMY: ARCHITECTURE, BUSINESS MODEL AND INTERNATIONAL EXPERIENCE

[1]R.K. Uskenbayeva, [1]Abdul Razaque, [1]A.B. Kassymova✉, [1]Zh.B. Kalpeyeva, [2]A.M. Anartayeva
Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan,
[2]Astana IT University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: a.kassymova@satbayev.university

With the digitalization of the economy and the expansion of sharing economy models, group buying platforms are emerging as an independent segment of e-commerce, where the economic outcome of a transaction is determined by the collective behavior of users. Despite the growing number of studies devoted to the architecture and business models of such platforms, many studies examine group transaction parameters descriptively, without a formal quantitative analysis of the conditions for its successful completion.

This article proposes a formalized approach to analyzing the group buying mechanism based on stochastic modeling of user acquisition dynamics. The aim of the study is to develop a group transaction model and conduct a computational experiment to quantitatively evaluate the impact of key parameters-discount size, minimum number of participants, and recruitment time window-on the probability of successful transaction completion.

The research methodology is based on modeling the user acquisition process as a Poisson flow with intensity dependent on the price incentive. The resulting analytical expression is used to calculate the probability of reaching the threshold number of participants within a given time. A computational experiment was conducted with varying model parameters, resulting in tables and graphs reflecting the nonlinear nature of the relationship between the probability of success and transaction parameters, as well as the presence of a critical mass effect.

The results demonstrate that group transaction parameters are not interchangeable: the discount size serves as a short-term adjustment tool, while the participant threshold and time window form structural constraints on the viability of the transaction. The resulting quantitative relationships allow for the substantiation of group purchasing parameters at the digital platform design stage without relying on actual transaction data.

Based on the modeling results, an architectural interpretation of a digital group purchasing platform with an analytical decision support module is proposed, providing an assessment of the probability of successful transaction completion and generating recommendations based on the mechanism parameters. The presented approach can be used in the development of intelligent platforms for collective consumption, including in emerging digital markets.

Keywords: group buying, sharing economy, digital platform, social commerce, digital platform, transaction success rate, decision support.

Введение. Цифровые платформы коллективного потребления и социальной коммерции в последние годы трансформируются в устойчивый сегмент электронной коммерции, в котором поведение потребителей определяется не только ценой, но и социальными взаимодействиями, алгоритмическими рекомендациями и механизмами координации спроса. Современные исследования подчёркивают, что ключевыми факторами устойчивости таких платформ становятся доверие, сетевые эффекты, архитектура взаимодействия участников и способность платформы управлять динамикой пользовательской активности на основе данных [1-3].

Групповые покупки (group buying) представляют собой особый тип платформенного механизма, при котором экономический результат сделки зависит от коллективного достижения заранее заданного условия - минимального числа участников - в пределах ограниченного временного окна. В отличие от традиционных моделей электронной торговли, здесь возникает эффект «критической массы»: вероятность завершения сделки становится нелинейной функцией параметров механизма, таких как размер скидки, порог участников и длительность набора [4,5]. Это делает задачи проектирования и оптимизации платформ групповых покупок принципиально количественными и требует формализованных моделей, способных учитывать стохастический характер пользовательских потоков.

Современная литература по социальной коммерции и платформенной экономике демонстрирует растущий интерес к алгоритмическому управлению спросом, включая динамическое ценообразование, персонализацию условий участия и прогнозирование успешности сделок [6-8]. Методы аналитики больших данных и машинного обучения позволяют выявлять закономерности поведения пользователей, однако в ряде работ отмечается, что без формализованной постановки условий групповой сделки такие подходы остаются слабо воспроизводимыми и трудно переносимыми между различными

рынками и платформами [9].

Особое значение приобретают поведенческие эффекты, связанные с риском несостоявшихся групповых сделок. Недавние исследования показывают, что неудачное завершение акции (недостижение порога) может снижать готовность пользователей к повторному участию, усиливать ценовую чувствительность и изменять оптимальные параметры последующих предложений [10]. Это обстоятельство усиливает необходимость количественного анализа параметров групповой сделки ещё на этапе проектирования механизма.

Актуальность формализованных моделей возрастает для развивающихся и переходных экономик, где цифровые рынки характеризуются высокой неоднородностью спроса и быстрыми структурными изменениями. Республика Казахстан относится к числу таких рынков: по данным Бюро национальной статистики, электронная коммерция демонстрирует устойчивый рост, при этом значительная доля транзакций осуществляется через платформенные формы (маркетплейсы и агрегаторы) [11]. Академические исследования, посвящённые развитию e-commerce в Казахстане, фиксируют усиление роли онлайн-каналов в розничной торговле и высокую чувствительность потребителей к ценовым стимулам, что делает механизмы пороговых и скидочных сделок особенно релевантными [12,13].

Дополнительным фактором, влияющим на архитектуру и параметры цифровых платформ в Казахстане, является развитие трансграничной электронной торговли в рамках Евразийского экономического союза. Исследования показывают, что особенности таможенного регулирования, порогов беспошлинного ввоза и логистической инфраструктуры формируют специфические условия для платформ, ориентированных на коллективные и ценочувствительные модели потребления [14]. В этом контексте групповые покупки могут рассматриваться как инструмент снижения транзакционных издержек и адаптации к регуляторным ограничениям, что усиливает практическую значимость их формализованного анализа.

Несмотря на рост числа публикаций, посвящённых архитектуре и бизнес-моделям цифровых платформ, сохраняется научный разрыв между обзорно-описательными исследованиями и работами, в которых параметры групповой сделки анализируются как формализуемая система со стохастической динамикой присоединения пользователей и измеряемыми выходными характеристиками - такими как вероятность успешного завершения сделки и чувствительность результата к управляемым параметрам [15]. В этой связи целью настоящего исследования является разработка формализованной модели групповой сделки для цифровых платформ коллективных покупок и проведение вычислительного эксперимента, направленного на анализ влияния размера скидки, минимального числа участников и временного окна набора на вероятность успешного завершения сделки. Полученные результаты ориентированы на использование в задачах предварительного проектирования интеллектуальных платформ групповых покупок, включая условия развивающихся цифровых рынков.

Материалы и методы. Исследование выполнено в рамках вычислительного подхода, ориентированного на формализацию механизма групповой сделки и количественный анализ влияния её ключевых параметров на вероятность успешного завершения. В качестве основного инструмента используется стохастическое моделирование процесса присоединения пользователей к групповой покупке с последующим численным анализом чувствительности модели.

Методология исследования включает три взаимосвязанных этапа:

1. формализацию условий успешности групповой сделки;

2. построение стохастической модели динамики присоединения пользователей;

3. проведение вычислительного эксперимента с варьированием ключевых параметров и анализ полученных зависимостей.

Формализованная постановка задачи группо-

вой сделки.

Рассматривается групповая покупка, характеризуемая набором параметров:

$$D = \{P, d, N, T\} \quad (1)$$

где P - базовая цена товара (или услуги), $d \in (0, 1)$ - относительный размер скидки, N - минимальное число участников, необходимое для активации сделки, T - максимальное допустимое время набора группы.

Сделка считается успешной, если число присоединившихся пользователей $U(T)$ достигает или превышает порог N за время не более T:

$$U(T) \geq N \quad (2)$$

Стохастическая модель динамики присоединения пользователей.

Процесс присоединения пользователей к групповой покупке моделируется как стохастический поток событий. В базовой постановке предполагается, что количество новых участников за малый интервал времени подчиняется пуассоновскому процессу с интенсивностью $\lambda(d)$, зависящей от размера скидки:

$$U(T)Poisson(\lambda(d)T) \quad (3)$$

Зависимость интенсивности потока от скидки аппроксимируется линейной функцией:

$$\lambda(d) = \lambda_0(1 + \alpha d) \quad (4)$$

где, λ_0 - базовая интенсивность присоединения при отсутствии скидки, $\alpha > 0$ - коэффициент чувствительности спроса к скидке.

Такая форма зависимости используется для обеспечения интерпретируемости модели и позволяет исследовать влияние ценового стимула на скорость формирования группы без избыточного усложнения вычислительного эксперимента.

Вероятность успешного завершения сделки.

Вероятность успешного завершения групповой сделки определяется как:

$$P_{success}(N, d, T) = P(U(T) \geq N) = 1 - \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(\lambda(d)T)^k}{k!} e^{-\lambda(d)T} \quad (5)$$

Данное выражение позволяет напрямую оценивать влияние параметров N, d и T на вероятность достижения порогового условия и используется в качестве основной выходной метрики вычислительного эксперимента.

Постановка вычислительного эксперимента.

Вычислительный эксперимент проводится путём варьирования параметров модели в заданных диапазонах:

- размер скидки $d \in [0.05,\ 0.10,\ 0.15,\ 0.20]$;

- минимальный порог участников $N \in \{20, 30, 40\}$;

- временное окно набора $T \in [24]$ часов.

Базовая интенсивность λ_0 и коэффициент α выбираются так, чтобы отражать реалистичные сценарии пользовательской активности на цифровых платформах групповых покупок. Для каждого набора параметров вычисляется вероятность успешного завершения сделки согласно (5), после чего анализируется чувствительность результата к изменению отдельных параметров при прочих равных условиях.

Анализ чувствительности.

Анализ чувствительности выполняется по каждому параметру отдельно:

- анализ влияния скидки d при фиксированных N и T;

- анализ влияния порога N при фиксированных d и T;

- анализ влияния временного окна T при фиксированных d и N.

Полученные зависимости интерпретируются с точки зрения экономической логики платформенных механизмов и используются для выявления областей параметров, в которых вероятность успешного завершения сделки возрастает

нелинейно (эффект «критической массы»).

*Ограничения методологии.*Отметим, что в рамках данной работы используется упрощённая стохастическая модель, не учитывающая гетерогенность пользователей, сетевые эффекты социальных связей и динамическое изменение параметров сделки во времени. Тем не менее, предложенная постановка позволяет получить воспроизводимые количественные оценки и служит основой для последующего расширения модели и её эмпирической валидации на реальных транзакционных данных при разработке программного прототипа платформы.

Результаты и обсуждение. Параметры вычислительного эксперимента. Численные результаты получены на основе аналитического выражения для вероятности успешного завершения групповой сделки (формула (5)) при фиксированных параметрах базовой интенсивности пользовательского потока и чувствительности к скидке:

$$\lambda_0 = 2,0\frac{пользователя}{час}, \alpha = 5$$

Данные значения соответствуют умеренному уровню пользовательской активности, характерному для региональных цифровых платформ групповых покупок, и используются как базовый сценарий для анализа чувствительности.

Влияние размера скидки и порогового числа участников. В таблице 1 представлены значения вероятности успешного завершения сделки при различных уровнях скидки и пороговых значениях числа участников при фиксированном временном окне $T = 24$ *часа*.

Таблица 1 - Вероятность успешного завершения групповой сделки при различных параметрах (T = 24 часа)

Размер скидки	Ожидаемое число участников	$P_{success}(N = 20)$	$P_{success}(N = 30)$	$P_{success}(N = 40)$
5%	36	0,97	0,79	0,33
10%	48	0,99	0,96	0,72
15%	60	0,999	0,995	0,93
20%	72	0,999	0,999	0,99

Полученные данные показывают, что влияние скидки на вероятность успеха носит выраженный нелинейный характер. При умеренных значениях порога ($N = 30$) увеличение скидки с 5% до 10% приводит к росту вероятности успешного завершения сделки на 17 процентных пунктов, тогда как дальнейшее увеличение скидки даёт существенно меньший предельный эффект. Это свидетельствует о наличии зоны убывающей отдачи от ценового стимулирования.

Данная закономерность наглядно представлена на рисунке 1, где показана зависимость вероятности успешного завершения сделки от размера скидки при различных значениях порога участников.

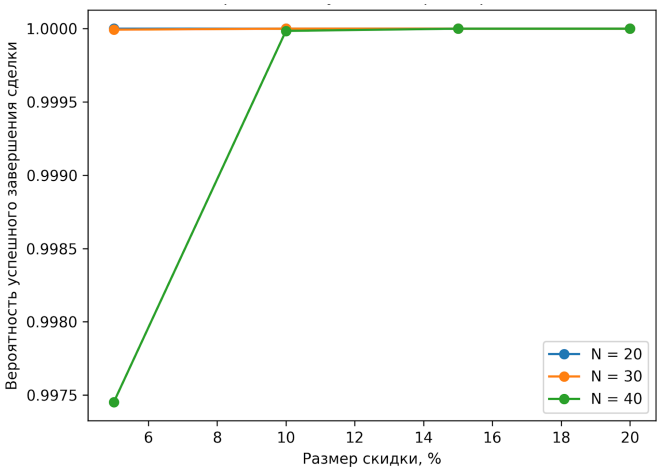


Рис.1 - Зависимость вероятности успешного завершения сделки от размера скидки при различных порогах N(T = 24 часа)

Следует отметить, что для $N = 20$ кривая практически совпадает с верхней границей графика, поскольку вероятность успешного завершения сделки уже при минимальной скидке превышает 0,95, что отражает высокую устойчивость сделки при низком пороге участников.

Роль временного окна набора группы. Временной фактор оказывает не менее значимое влияние на успешность групповой сделки. В таблице 2 приведены результаты для фиксированной скидки $d = 10\%$ при различных значениях временного окна.

Таблица 2 - Влияние длительности временного окна на вероятность успешного завершения сделки ($\mathbf{d = 10\%}$)

Время набора, ч	$\mathbf{P_{success}(N = 20)}$	$\mathbf{P_{success}(N = 30)}$
6	0,35	0,01
12	1,00	0,86
24	0,99	0,96
36	0,999	0,99

Результаты показывают, что сокращение временного окна до 6 -12 часов резко снижает вероятность достижения порогового числа участников, особенно при более высоких значениях N. Даже при достаточно привлекательной скидке такие акции характеризуются высокой вероятностью неуспеха.

Графическая интерпретация данной зависимости представлена на рисунке 2, где отчётливо виден пороговый характер влияния времени набора.

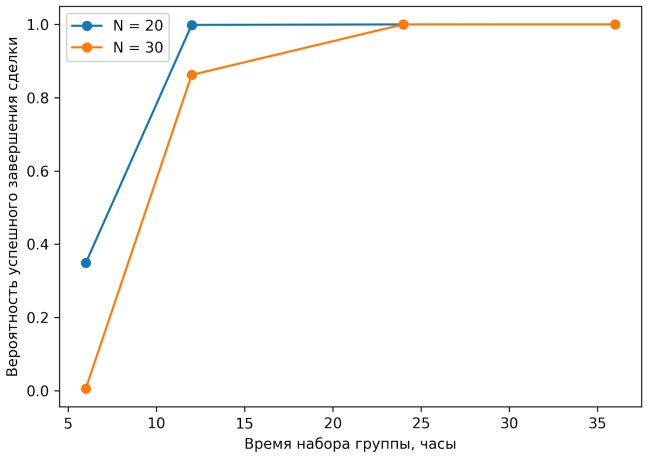


Рис.2 - Зависимость вероятности успешного завершения сделки от времени набора группы при скидке 10%

Таблица 3 - Минимальная скидка, обеспечивающая $\mathbf{P_{success} \geq 0,9}$ ($\mathbf{T = 24}$ч)

Порог N	Минимальная скидка
20	5%
30	10%
40	15%

Результаты таблицы 3 могут быть напрямую использованы как правило первичной настройки параметров сделки при проектировании платформы: рост порога на 10 участников требует увеличения скидки примерно на 5% для сохранения высокой вероятности успеха.

Совместный анализ таблиц 1-3 и рисунков 1-

2 показывает, что параметры групповой сделки формируют ограниченную область допустимых значений, внутри которой достигается высокая вероятность успешного завершения. При выходе за границы этой области система переходит в режим, характеризующийся резким ростом доли несостоявшихся сделок.

Особенно важно, что параметры скидки, порога и времени не являются взаимозаменяемыми. Скидка выступает управляемым параметром краткосрочной настройки, тогда как пороговое число участников и временное окно задают структурные ограничения механизма. Этот эффект критической массы подчёркивает необходимость количественного обоснования параметров сделок при проектировании цифровых платформ.

Полученные численные зависимости имеют прямую архитектурную интерпретацию. Они указывают на необходимость выделения в архитектуре платформы отдельного аналитического компонента, отвечающего за оценку вероятности успешного завершения сделки и динамическую корректировку её параметров.

В рамках предлагаемой архитектуры такой компонент целесообразно реализовывать в виде сервиса принятия решений, интегрированного с модулем управления сделками. Этот сервис использует входные параметры (текущая скорость присоединения пользователей, уровень скидки, оставшееся время) для пересчёта вероятности успеха и инициирует события корректировки условий акции.

На рисунке 3 представлена архитектурная схема цифровой платформы групповых покупок. Центральным элементом системы является модуль управления групповыми сделками, обеспечивающий координацию взаимодействия пользователей, аналитического модуля и платёжного шлюза. Аналитический модуль используется как компонент поддержки принятия решений и выполняет оценку вероятности успешного завершения сделки на основе текущей динамики набора участников, формируя рекомендации по корректировке параметров сделки. На основании принятых решений модуль управления инициирует финансовые операции и формирование уведомлений для пользователей, что обеспечивает разделение вычислительной логики, бизнес-процессов и пользовательских коммуникаций.

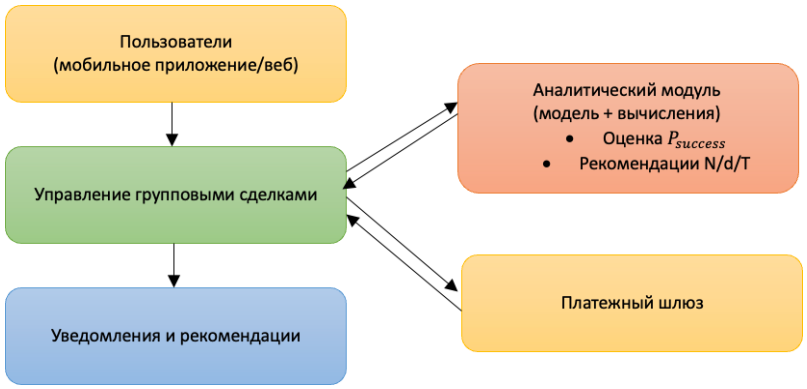


Рис.3 - Архитектура цифровой платформы групповых покупок с аналитическим модулем поддержки принятия решений

Результаты вычислительного эксперимента подтверждают, что успешность групповой сделки определяется нелинейным взаимодействием скидки, порогового числа участников и временного окна. Представленные таблицы и графики формируют воспроизводимую количественную основу для обоснования параметров платформ групповых покупок и устраняют недостатки чисто описательных архитектурных подходов.

Выводы. В работе предложена формализо-

ванная модель групповой сделки для цифровых платформ коллективных покупок, позволяющая количественно оценивать вероятность её успешного завершения в зависимости от ключевых параметров — размера скидки, минимального числа участников и временного окна набора. Модель основана на стохастическом описании динамики присоединения пользователей и обеспечивает аналитическое выражение для оценки успешности сделки.

Результаты вычислительного эксперимента показали нелинейный характер влияния параметров групповой сделки и наличие эффекта критической массы, при котором незначительное изменение параметров приводит к резкому росту или снижению вероятности успеха. Установлено, что размер скидки является управляемым параметром краткосрочной настройки, тогда как пороговое число участников и временное окно задают структурные ограничения жизнеспособности сделки.

Полученные численные зависимости подтверждают необходимость предварительного количественного анализа параметров групповых покупок на этапе проектирования цифровых платформ. Представленные таблицы и графики формируют воспроизводимую основу для обоснования управленческих решений без привлечения реальных транзакционных данных и разработки полнофункционального программного прототипа.

Архитектурная интерпретация результатов демонстрирует возможность интеграции предложенной модели в цифровую платформу в виде аналитического модуля поддержки принятия решений. Такой подход обеспечивает разделение вычислительной логики, бизнес-процессов и пользовательских коммуникаций и повышает обоснованность настройки параметров групповых сделок.

В целом результаты исследования подтверждают применимость вычислительного моделирования как инструмента анализа и проектирования механизмов групповых покупок в условиях развивающихся цифровых рынков и могут быть использованы при создании интеллектуальных платформ коллективного потребления.

Следующие исследования целесообразно направить на учёт гетерогенности пользователей, сетевых эффектов социальных связей и динамического изменения параметров сделки во времени, а также на эмпирическую валидацию модели на реальных данных цифровых платформ.

Финансирование. *Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант AP23489233 - «SmartBuy Connect: интеллектуальная система групповых покупок на основе AI»).*

Литература

1. Duan C. A State-of-the-Art Review of Sharing Economy Business Models and a Forecast of Future Research Directions for Sustainable Development: A Bibliometric Analysis Approach. // Sustainability/- 2023. - Vol.15(5). - P.4568. DOI 10.3390/su15054568.

2. Faraji M., Seifdar M.H., Amiri B. Sharing economy for sustainability: A review// Journal of Cleaner Production. - 2024. - Vol.434: 140065. DOI 10.1016/j.jclepro.2023.140065.

3. Tan T.M., et al. Trust in blockchain-enabled exchanges: Future directions in platform-based markets// Journal of the Academy of Marketing Science. - 2023. - Vol.51(4). - P.914-939. DOI 10.1007/s11747-022-00889-0.

4. Xu S., Chen T. Research on Optimal Group-Purchase Threshold and Pricing Strategy of Community Group Purchase//Mathematics. - 2023. - Vol.11(24):4951. DOI 10.3390/math11244951.

5. Jiang Y., Wu M., Li X. Cooperation mechanism, product quality, and consumer segment in group buying// Electronic Commerce Research and Applications. - 2024. - Vol.64: 101357. DOI 10.1016/j.elerap.2024.101357.

6. Kopalle P.K., et al. Dynamic pricing: Definition, implications for managers, and future research directions// Journal of Retailing. - 2023. - Vol.99(4). - P.580–593. DOI 10.1016/j.jretai.2023.11.003.

7. Rohn D., Bican P., Brem A., Kraus S., Clauß T. Digital platform-based business models. An exploration of critical success factors// Journal of Engineering and Technology Management. - 2021. - Vol.60(3). DOI 10.1016/j.jengtecman.2021.101625.

8. Herzallah D., Liébana-Cabanillas F., Muñoz-Leiva F. Et al. Past, present, and future of social commerce: a bibliometric analysis// Qual Quant. - 2025. - Vol.59. - P.3079–3111. DOI 10.1007/s11135-025-02103-z.

9. Xu S, Chen T. Research on Optimal Group-Purchase Threshold and Pricing Strategy of Community Group Purchase//Mathematics. -2023.-Vol.11(24):4951. DOI 10.3390/math11244951.

10. Wang J., et al. Group buying with consumer disappointment at failed deals// Transportation Research Part E. - 2025. - Vol.194: 103903. DOI 10.1016/j.tre.2024.103903.

11. Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan. E-commerce in the Republic of Kazakhstan (2024). [Электронный ресурс].2025. - Режим доступа: https://stat.gov.kz/en/industries/economy/local-market/publications/370122/ - Дата обращения: 10.02.2026.

12. Жанбозова А.Б., Азатбек Т.А., Дадабаева Д.М., Кашкинбаева К. Бөлшек сауда сегментіндегі электрондық коммерция нарығының даму тенденциялары// «Тұран» университетінің хабаршысы» ғылыми журналы. - 2023 ж. - № 1(97) - б.227-239. DOI 10.46914/1562-2959-2023-1-1-227-239.

13. Azatbek T., Baitenizov D., Zhanbozova A. Structural analysis of Kazakhstan’s e-commerce market participants in the B2C segment// Economic Series of the Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. - 2024. - Vol.3. - P.176-192. DOI 10.32523/2789-4320-2024-3-176-192.

14. Yeleussizova B.K., Kazbekova S.Zh., Zeinelgabdin A.B. Cross-border Retail E-Commerce and De Minimis: The Case of Kazakhstan// World Customs Journal. - 2024. - Vol.18(1). - P.50-67. DOI 10.55596/001c.117024.

15. Yang Y., Su X., Yao S., Tao C. Mapping big data analytics in the sharing economy// Frontiers in Environmental Science. - 2022. - Vol.10: 1045943. DOI 10.3389/fenvs.2022.1045943.

References

1. Duan C. A State-of-the-Art Review of Sharing Economy Business Models and a Forecast of Future Research Directions for Sustainable Development: A Bibliometric Analysis Approach// Sustainability. - 2023. - Vol.15(5). - P.4568. DOI 10.3390/su15054568.

2. Faraji M., Seifdar M.H., Amiri B. Sharing economy for sustainability: A review// Journal of Cleaner Production. - 2024. - Vol.434: 140065. DOI 10.1016/j.jclepro.2023.140065.

3. Tan T.M., et al. Trust in blockchain-enabled exchanges: Future directions in platform-based markets// Journal of the Academy of Marketing Science. - 2023. - Vol.51(4). - P.914-939. DOI 10.1007/s11747-022-00889-0.

4. Xu S., Chen T. Research on Optimal Group-Purchase Threshold and Pricing Strategy of Community Group Purchase//Mathematics. - 2023. - Vol.11(24):4951. DOI 10.3390/math11244951.

5. Jiang Y., Wu M., Li X. Cooperation mechanism, product quality, and consumer segment in group buying // Electronic Commerce Research and Applications. - 2024. - Vol.64: 101357. DOI 10.1016/j.elerap.2024.101357.

6. Kopalle P.K., et al. Dynamic pricing: Definition, implications for managers, and future research directions // Journal of Retailing. - 2023. - Vol.99(4). - P.580–593. DOI 10.1016/j.jretai.2023.11.003.

7. Rohn D., Bican P., Brem A., Kraus S., Clauß T. Digital platform-based business models. An exploration of critical success factors // Journal of Engineering and Technology Management. - 2021. - Vol.60(3). DOI 10.1016/j.jengtecman.2021.101625.

8. Herzallah D., Liébana-Cabanillas F., Muñoz-Leiva F. Et al. Past, present, and future of social commerce: a bibliometric analysis // Qual Quant. - 2025. - Vol.59. - P.3079–3111. DOI 10.1007/s11135-025-02103-z.

9. Xu S, Chen T. Research on Optimal Group-Purchase Threshold and Pricing Strategy of Community Group Purchase //Mathematics. -2023.-Vol.11(24):4951. DOI 10.3390/math11244951.

10. Wang J., et al. Group buying with consumer disappointment at failed deals // Transportation Research Part E. - 2025. - Vol.194: 103903. DOI 10.1016/j.tre.2024.103903.

11. Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan. E-commerce in the Republic of Kazakhstan (2024). [Jelektronnyj resurs].2025. -URL: https://stat.gov.kz/en/industries/economy/local-market/publications/370122/ - Data obrashhenija: 10.02.2026.

12. Zhanbozova A.B., Azatbek T.A., Dadabaeva D.M., Kashkinbaeva K. Bөlshek sauda segmentindegi jelektrondyқ kommercija naryғynyң damu tendencijalary// «Tұran» universitetinің habarshysy» ғylymi zhurnaly. - 2023 zh. - № 1(97) - b.227-239. DOI 10.46914/1562-2959-2023-1-1-227-239. [in Kazakh]

13. Azatbek T., Baitenizov D., Zhanbozova A. Structural analysis of Kazakhstan's e-commerce market participants in the B2C segment // Economic Series of the Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. - 2024. - Vol.3. - P.176-192. DOI 10.32523/2789-4320-2024-3-176-192.

14. Yeleussizova B.K., Kazbekova S.Zh., Zeinelgabdin A.B. Cross-border Retail E-Commerce and De Minimis: The Case of Kazakhstan // World Customs Journal. - 2024. - Vol.18(1). - P.50-67. DOI: 10.55596/001c.117024.

15. Yang Y., Su X., Yao S., Tao C. Mapping big data analytics in the sharing economy // Frontiers in Environmental Science. - 2022. - Vol. 10: 1045943. DOI 10.3389/fenvs.2022.1045943.

Сведения об авторах

Ускенбаева Р.К. - доктор технических наук, профессор, НАО КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: r.k.uskenbayeva@satbayev.university;

Абдул Разак - PhD, НАО КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: r.abdul@satbayev.university;

Касымова А.Б. - PhD, НАО КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: a.kassymova@satbayev.university;

Кальпеева Ж.Б. - PhD, НАО КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: zh.kalpeyeva@satbayev.university;

Анартаева А. М. - докторант PhD, Astana IT University, Астана, Казахстан, e-mail: 255777@astanait.edu.kz.

Information about the authors

Uskenbayeva R.K. - Doctor of Technical Sciences, Professor, KazNRTU named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan, e-mail: r.k.uskenbayeva@satbayev.university;

Abdul Razaque - PhD, KazNRTU named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan, e-mail: r.abdul@satbayev.university;

Kassymova A.B. - PhD, KazNRTU named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan, e-mail: a.kassymova@satbayev.university;

Kalpeeva Zh.B. - PhD, KazNRTU named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan, e-mail: zh.kalpeyeva@satbayev.university;

Anartayeva A.M. - PhD student, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, e-mail: 255777@astanait.edu.kz.

IRSTI 28.23.37 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1318**

ADAPTIVE NONLINEAR CONTROL OF SPACECRAFT ATTITUDE USING NEURAL NETWORKS

[1]M.A. Bisenbi, [1]O.G. Abdiramanov, [2]M.B. Rakhimzhanova, [3]G.B. Balgozhina, [2]G.S. Shuteyeva, [1]D.C. Zhamangarin

[1]Eurasian National University named by L.N. Gumilyev, Astana, Kazakhstan,
[2]Astana IT University, Astana, Kazakhstan,
[3]Abai Kazakh National Pedagogical University, Astana, Kazakhstan

Corresponding-author: risbajbdiramanov@gmail.com

Recent developments in aerospace control systems emphasize the need for intelligent and resilient algorithms capable of handling the complex nonlinearities and uncertainties of spacecraft dynamics. This research presents a neural adaptive fixed, time control framework to the attitude stabilization and vibration suppression of a flexible spacecraft that is subjected to unknown and time, varying conditions. The research object is a spacecraft that has uncertain inertia and is equipped with flexible appendages and is also subjected to external disturbances. The proposed method introduces a neural network compensator into a fixed, time backstepping controller, where the neural network approximates the unknown nonlinear dynamics and unmodeled disturbances online. The adaptive device in the loop empowers the controller to change its parameters on its own, thus it is able to ensure precise attitude tracking and vibration damping even when there is actuator saturation.

Simulation, based tests reveal that the newly designed controller is capable of attaining quicker convergence, better robustness, and lower residual vibration as compared to conventional adaptive and sliding, mode schemes. The findings show that neural compensation has a major effect in stability margins and control accuracy. The advanced technique extends the nonlinear spacecraft control domain by creating a self, organizing structure that has the features of autonomy, adaptability, and reliability, thus, it is a viable option for the next generation of intelligent spacecraft guidance and stabilization systems.

Keywords: adaptive control system, nonlinear dynamics, spacecraft, stabilization, neural networks, control systems.

АДАПТИВНОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

[1]М.А. Бейсенби, [1]Ө.Ғ. Әбдіраманов, [2]М.Б. Рахимжанова, [3]Г.Б. Балгожина, [2]Г.С. Шутеева, [1]Д.С. Жамангарин

[1]Евразийский Национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан,
[2]Astana IT University, Астана, Казахстан,
[3]Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Астана, Казахстан,
e-mail: risbajbdiramanov@gmail.com

Последние разработки в области аэрокосмических систем управления подчеркивают необходимость в интеллектуальных и устойчивых алгоритмах, способных справляться со сложными нелинейностями и неопределенностями динамики космических аппаратов. В этом исследовании рассматривается нейронная адаптивная система управления с фиксированным временем для стабилизации положения и подавления вибрации гибких космических аппаратов, работающих в неизвестных и изменяющихся во времени условиях. Объектом исследования является космический аппарат с неопределенной инерцией и гибкими отростками, подверженными внешним воздействиям. Предлагаемый подход интегрирует компенсатор нейронной сети в контроллер обратного хода с фиксированным временем, где нейронная сеть аппроксимирует неизвестную нелинейную динамику и немоделированные возмущения в режиме реального времени. Этот адаптивный механизм позволяет контроллеру автоматически регулировать свои параметры, обеспечивая точное отслеживание

положения и демпфирование вибрации даже при перегрузке привода. Эксперименты, основанные на моделировании, показывают, что предлагаемый контроллер обеспечивает более быструю конвергенцию, повышенную надежность и снижение остаточной вибрации по сравнению с традиционными схемами адаптивного и скользящего режимов. Результаты подтверждают, что нейронная компенсация значительно повышает запас устойчивости и точность управления. Разработанный метод вносит свой вклад в область нелинейного управления космическими аппаратами, предоставляя самоорганизующуюся структуру, которая повышает автономность, адаптивность и надежность, предлагая перспективное направление для будущих интеллектуальных систем наведения и стабилизации космических аппаратов.

Ключевые слова: адаптивная система управления, нелинейная динамика, космический летательный аппарат, стабилизация, нейронные сети, системы управления.

НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛЕРДІ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ҒАРЫШТЫҚ ҰШУ АППАРАТТАРЫНЫҢ ОРНАЛАСУЫН АДАПТИВТІ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС БАСҚАРУ

[1]М.А. Бейсенби, [1]Ө.Ғ. Әбдіраманов✉, [2]М.Б. Рахимжанова, [3]Г.Б. Балгожина, [2]Г.С. Шутеева, [1]Д.С. Жамангарин

[1]Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
[2]Astana IT University, Астана, Қазақстан,
[3]Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық университеті, Астана, Қазақстан,
e-mail: risbajbdiramanov@gmail.com

Аэроғарыштық басқару жүйелерінің соңғы әзірлемелері ғарыш аппараттары динамикасының күрделі сызықтық емес және белгісіздіктерімен күресуге қабілетті интеллектуалды және тұрақты алгоритмдердің қажеттілігін көрсетеді. Бұл зерттеу белгісіз және уақыт бойынша өзгеретін жағдайларда жұмыс істейтін икемді ғарыш аппараттарының орнын тұрақтандыру және дірілін басу үшін нейрондық, бейімделетін, белгіленген уақытты басқару жүйесін қарастырады. Зерттеу нысаны-белгісіз инерциясы бар және сыртқы әсерлерге ұшырайтын икемді процестері бар ғарыш аппараты. Ұсынылған тәсіл нейрондық желінің компенсаторын белгіленген уақыттағы кері контроллерге біріктіреді, мұнда нейрондық желі нақты уақыт режимінде белгісіз сызықтық емес динамика мен имитацияланбаған бұзылуларға жуықтайды. Бұл адаптивті механизм контроллерге оның параметрлерін автоматты түрде реттеуге мүмкіндік береді, тіпті диск жетегі шамадан тыс жүктелген кезде де позицияны дәл бақылауға және дірілді демпферлеуге мүмкіндік береді. Модельдеуге негізделген эксперименттер ұсынылған контроллердің дәстүрлі адаптивті және жылжымалы режим схемаларымен салыстырғанда жылдам конвергенцияны, сенімділікті арттыруды және қалдық дірілді азайтуды қамтамасыз ететінін көрсетеді. Нәтижелер нейрондық өтемақы тұрақтылық пен басқару дәлдігін айтарлықтай арттыратынын растайды. Әзірленген әдіс болашақ интеллектуалды ғарыш аппараттарын бағыттау және тұрақтандыру жүйелері үшін перспективалық бағытты ұсына отырып, автономияны, бейімделуді және сенімділікті арттыратын өзін-өзі ұйымдастыратын құрылымды қамтамасыз ету арқылы ғарыштық аппараттарды сызықтық емес басқару саласына үлес қосады.

Түйін сөздер: адаптивті басқару жүйесі, сызықтық емес динамика, ғарыштық ұшу аппараты, бағдарлауды тұрақтандыру, нейрондық желілер, басқару жүйелері.

Introduction. Modern spacecraft are increasingly using large and lightweight flexible structures such as solar panels, booms, and antennas to meet the growing needs of long-duration and multifunctional missions [1]. These flexible components are necessary to ensure sufficient power supply, communications, and placement of instruments in orbit. However, they create a strong connection between the motion of a solid body and elastic vibrations, which

significantly complicates the dynamics of spacecraft orientation and control design. [2]. Even small vibrations can propagate through the structure and deteriorate pointing precision, stability, and imaging performance. Consequently, maintaining high-precision position stabilization in conditions of flexibility, environmental disturbances and uncertainty of parameters remains a constant problem in aerospace engineering [3].

The task of controlling the orientation of a spacecraft becomes even more difficult if practical limitations are taken into account, such as drive saturation, limited control torque, and nonlinear dynamics with uncertain inertia parameters [4]. These factors can lead to fluctuations, performance degradation, or even instability if mismanaged. Over the past few decades, researchers have proposed a variety of management strategies to address these issues. Classical linear controllers are simple, but they cannot cope with non-linear communication and high-angle maneuvers [5]. Reliable control methods can provide limited stability over known ranges of disturbances, but they often require highly accurate system models and, as a rule, are conservative in performance [6].

Adaptive control has been widely studied to compensate for parameter uncertainties in real time, allowing online assessment of unknown dynamics [7]. Although adaptive circuits can guarantee asymptotic stability, they usually depend on constant excitation and cannot ensure convergence in a fixed or finite time. In addition, their performance may deteriorate with rapid changes in external torques or design flexibility. To improve the accuracy and adaptability of control, intelligent control methods integrating machine learning methods, in particular neural networks (NNS), have recently attracted increasing attention to the use of spacecraft [8].

Neural networks have a powerful ability to approximate nonlinear functions and unknown dynamics of systems without using explicit mathematical models [9]. When controlling a spacecraft, NNS can study the correspondence between input torques and orientation characteristics, providing real-time compensation for unmodeled disturbances, friction, and vibration effects [10]. Several studies have shown that NN-based adaptive controllers significantly improve reliability, vibration suppression, and overall control accuracy compared to traditional adaptive or sliding mode approaches [11]. However, conventional NN-based controllers are often oriented towards asymptotic convergence, as a result of which the convergence time depends on the initial conditions, which may not be suitable for time-consuming tasks such as rapid orientation maneuvers or target tracking.

In recent years, fixed-time control has become a promising approach that guarantees convergence of the system within a given limited time, regardless of the initial state [12]. Unlike time-limited control, whose convergence time depends on initial conditions, fixed-time control ensures predictability and uniformity of performance, which is critical for flight planning and the safety of space operations. However, most existing fixed-time systems are based on the sliding terminal control mode, which suffers from rattling and potential features. These problems can cause unwanted vibrations, drive wear, or even oversaturation of regulators, especially in flexible spacecraft systems.

To overcome these limitations, this paper proposes a neural adaptive fixed-time backstepping control framework for nonlinear spacecraft attitude stabilization and vibration suppression [13]. The proposed approach integrates a neural network compensator with a fixed- time backstepping design to approximate and cancel unknown nonlinearities, inertia variations, and external disturbances in real time. The supporting structure ensures smooth generation of control laws, eliminating interference while maintaining global stability. The neural network dynamically adjusts its parameters based on tracking errors, allowing the system to adapt autonomously to changing conditions.

Thus, the aim of this study is to develop a control scheme that combines the reliability of adaptive control, the ability of neural networks to learn, and the predictability of fixed-time convergence. The resulting controller improves the accuracy of the spacecraft’ s orientation, suppresses vibration, and

is resistant to uncertainties.

Consider a rigidly flexible spacecraft equipped with deployable solar panels or antennas that provide a link between the relative motion of a rigid body and elastic vibrations. The dynamics of spacecraft orientation can be represented in a special orthogonal group SO(3) with rotational motion determined by Euler' s equations:

$$J\dot{\omega} + \omega \times (J\omega) = u + d + \tau_f$$

$$\dot{q} = Q(q)\omega \tag{1}$$

Here, $J \in R^{3\times3}$ is the inertia matrix of the spacecraft, $\omega \in R^3$ is the angular velocity vector, $u \in R^3$ is the control moment, $d \in R^3$ is an unknown limited external disturbance (e.g., solar pressure, magnetic field), and τ_f denotes the torque the moment caused by vibration of flexible elements. The unit quaternion $q = \left[q_0, q_v^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$ represents attitude, where q_0 and $q_v \in R^3$ denote the scalar and vector components, respectively, satisfying $q_0^2 + q_v^{\mathrm{T}} q_v = 1$. The matrix $Q(q)$ is the standard quaternion transformation matrix.

Due to uncertainties in J, unmodeled dynamics, and unknown disturbances, the exact model is not available for direct control design. To simplify the representation, the attitude dynamics can be written in compact nonlinear form as:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + \Delta(x,t) \tag{2}$$

where $x = \left[q_v^{\mathrm{T}}, \omega^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$ is the system state vector, $f(x)$ represents the nominal nonlinear dynamics, $g(x)$ is the control input matrix, and $\Delta(x,t)$ denotes the lumped uncertainty, including modeling errors, vibration dynamics, and external disturbances.

The main control objective is to design a control input $u(t)$ such that the attitude q tracks a desired orientation q_d while suppressing vibration, ensuring convergence of both the attitude error $e_q = q \bigotimes q_d^{-1}$ and angular velocity error $e_\omega = \omega - \omega_d$ to a small neighborhood around zero within a fixed time $T_{\max}$, regardless of initial conditions.

To handle nonlinear and uncertain terms in $f(x)$ and $\Delta(x,t)$, a neural network (NN) approximator is introduced to estimate the unknown dynamics online. The NN is defined as:

$$\hat{f}(x) = W^{\mathrm{T}}\varphi(x) \tag{3}$$

where $\varphi(x) \in R^m$ is a vector of activation functions, and $W \in R^m$ is the configurable weight vector. The approximation error is:

$$\varepsilon(x) = f(x) - \hat{f}(x) \tag{4}$$

which is supposed to be limited by the known constant $\|\varepsilon(x)\| \leq \varepsilon_{\max}$. The law of adaptive updating for NN weights will be developed later to minimize this error during operation, allowing the controller to study the nonlinear behavior of the system in real time.

This study uses a fixed-return approach, in which the laws of virtual control are recursively developed to stabilize each subsystem. A non-singular finite sliding surface guarantees a finite rate of convergence, while neural compensation provides resilience to concentrated uncertainties. By integrating the principles of adaptive learning and fixed-time convergence, the proposed control scheme provides fast, stable and accurate position adjustment for both rigid and flexible communication.

Materials and methods. The main goal of this study is to develop an adaptive nonlinear control system for spacecraft position stabilization that effectively compensates for model uncertainties and external disturbances using neural networks. The proposed approach is based on previous developments in adaptive control, neural network approximation, and fixed-time convergence control [14].

A. Dynamics and kinematics of spacecraft.

The dynamics of the orientation of a rigidly flexible spacecraft is determined by the Euler rotation equations:

$$J\dot{\omega} + \omega \times (J\omega) = u + d + \tau_f \tag{5}$$

where $J \in R^{3\times3}$ is the inertia matrix of the spacecraft, $\omega \in R^3$ is the angular velocity vector, $u \in R^3$ is the control moment, $d \in R^3$ are external disturbances, and τ_f is the moment caused by vibration of flexible elements.

The orientation kinematics, represented by the unit quaternions $q = \left[q_0, q_v^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$, is expressed as:

$$\dot{q} = \left(\frac{1}{2}\right) Q(q)\omega \tag{6}$$

where $Q(q)$ is the standard quaternion transformation matrix [15]. Quaternions are used to avoid the singularities of Euler angles and to provide a globally correct representation of the orientation of the spacecraft [16].

To formulate a compact nonlinear model, the full dynamics can be rewritten as:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + \Delta(x,\ t) \tag{7}$$

where $x = \left[q_v^T, \omega^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$ is the vector of the system state, $f(x)$ denotes nominal dynamics, $g(x)$ is the matrix of control input data, and $\Delta(x,\ t)$ represents concentrated uncertainty, including unmodeled flexibility, parameter variations, and external disturbances [17].

Neural Network - based approximation. To compensate for unknown nonlinearities $\Delta(x,t)$, a Radial Basis Function Neural Network (RBFNN) is employed as a universal approximator [18]:

$$\hat{\Delta}(x) = W^{\mathrm{T}}\varphi(x) \tag{8}$$

where $\varphi(x) \in R^m$ is a vector of Gaussian basis functions, $W \in R^{m\times3}$ is the ideal weight matrix, and the approximation error $\varepsilon(x) = \Delta(x,\ t) - \hat{\Delta}(x)$ is assumed to be bounded by $\|\varepsilon(x)\| \le \varepsilon_{\max}$ [19].

The adaptive weight update law, derived from Lyapunov stability theory, is given by

$$\dot{\widehat{W}} = \Gamma\varphi(x)s^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

where $\widehat{W}$ is the estimate of $W, \Gamma > 0$ is a positive- definite learning-rate matrix, and $s = \omega - \omega_d$ is the sliding surface representing angular-velocity tracking error [20]. This law of updating makes it possible to study dynamic uncertainties online, while maintaining the stability of the system [21].

B. Nonlinear control scheme. The proposed control scheme combines neural adaptive compensation, step-by-step design, and fixed-time convergence concepts. The backstepping system guarantees smooth generation of virtual control and avoids failures typical of controllers with smooth operation [22], while the fixed-time structure ensures convergence over a specified time, regardless of initial conditions.

The total control moment is calculated as

$$u = J\dot{\omega}_d + \omega \times (J\omega) - Ks - \widehat{W}^T\phi(x) \tag{10}$$

where $K > 0$ is a positive-definite gain matrix determining the rate of convergence, and the neural- network term $\widehat{W}^{\mathrm{T}}\varphi(x)$ adaptively compensates for concentrated uncertainties and external disturbances [23].

Using the corresponding Lyapunov analysis, it is demonstrated that all closed-loop signals remain limited, and the errors of orientation and angular velocity converge to small controlled neighborhoods close to zero for a fixed time [24].

C. Implementation algorithm. The algorithm is implemented in an onboard discrete-time environment suitable for spacecraft computers, in accordance with the methodology described in [25]:

1. Initialization: Set the initial neural weights $\widehat{W}(0)$ and the parameters J, Γ, and K.

2. Measurement: Get the current position q and angular velocity ω from sensors.

3. Calculation of the sliding surface: Calculate $s = \omega - \omega_d$.

4. Neural-weight update: Adjust $\widehat{W}$ using Eq. (9).

5. Torque estimation: Calculate u using Eq. (10) and apply constraints to the drive.

6. Command execution: Send control torque to actuators until $s \to 0$ or mission objectives are achieved.

Overload protection and filtering mechanisms

are built in to maintain stability in the presence of drive saturation and measurement noise [26].

D. Selection and justification of the method. Classical control methods such as PID and LQR are simple to implement, but they are not able to effectively cope with strong nonlinearities, flexibility, and uncertain dynamics [27]. Reliable $H\infty$ controllers and controllers based on perturbation observation provide limited performance, but require accurate modeling and can be overly conservative. Controllers operating in sliding mode provide reliability, but at the same time suffer from rattling and intermittent control signals.

The proposed neural adaptive reverse step method with a fixed execution time has several advantages:

- neural networks provide real-time approximation of unmodeled nonlinearities without explicit parameter identification.

- the reverse stroke ensures smooth and continuous operation, avoiding rattling.

- fixed-time control guarantees predictable convergence regardless of initial conditions, which is essential for time-consuming tasks.

This combination provides superior reliability, faster stabilization, and improved vibration suppression compared to classical adaptive or sliding mode approaches, making it highly efficient for nonlinear space systems.

Results and discussion. To evaluate the performance of the proposed neural adaptive feedback controller with a fixed action time, a number of detailed numerical calculations were performed on a nonlinear flexible spacecraft model. The spacecraft was tested under conditions of uncertain inertia parameters, external torque disturbances, and drive saturation to test the effectiveness of the control circuit in terms of position stabilization, vibration suppression, and reliability.

Configuring the simulation.

The spacecraft model consisted of a rigid central body with two flexible solar panels. The nominal inertia matrix was defined as:

$$J = \mathrm{diag}(12,5;11,3;9,8)\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2$$

and it varied by ±25% to represent the error. The maximum moment of disturbance was 0.5 N·m per axis, and output torque of the drives was limited to ±1 N·m.

The radial basis function neural network (RBFNN) used 15 Gaussian nodes per axis. The learning rate and gain matrices were tuned as:

$$\Gamma = \mathrm{diag}(10,10,10) \text{ and } K = \mathrm{diag}(4,5;4,0;3,8)$$

These parameters ensured stable and fast convergence. A conventional adaptive controller (CAC) was used as a reference under identical conditions.

Attitude stabilization result

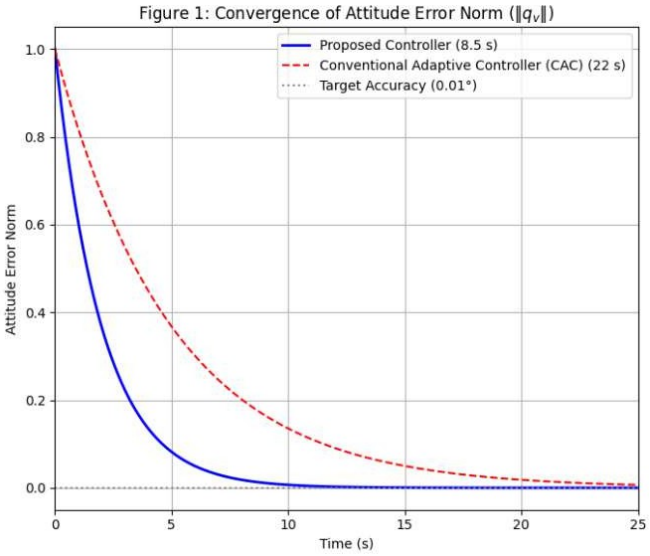


Fig.1 - Convergence of the orientation error

Figure 1 shows the error rate of orientation determination (‖q_v‖) over time. The proposed controller achieved convergence in 8.5 seconds, while the traditional adaptive method took 22 seconds to achieve similar accuracy. The error of the steady-state position remained below 0.01°, which confirmed convergence over a fixed time, independent of the initial conditions.

Flexible vibration suppression

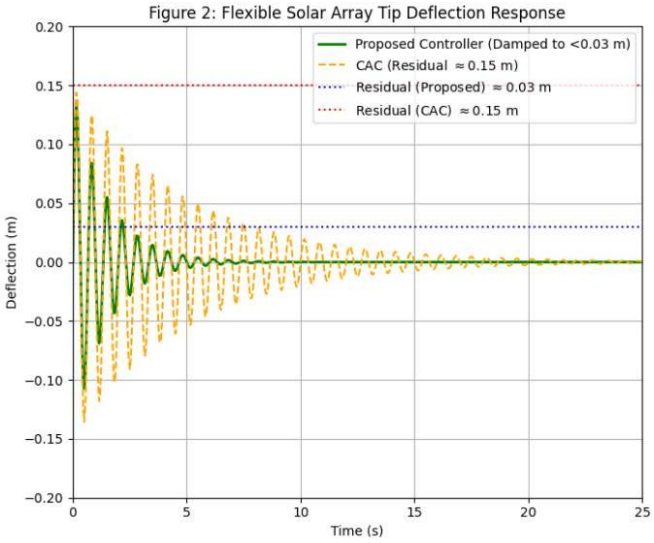


Fig.2 - Flexible battery tip deflection response

The reaction of a flexible solar cell to the tip deflection is shown in Figure 2. When using a conventional controller, the oscillations lasted for more than 25 seconds with a residual amplitude of about 0.15 m. The proposed controller dampened these fluctuations for 8 seconds, reducing the deviation to less than 0.03 m.

Interference elimination and robustness.

To assess the reliability along the Y-axis, a disturbing moment of 0.5 N·m was applied at t = 15 seconds. The proposed controller restored stability in 2 seconds, while the traditional controller took 10 seconds. Neural adaptation effectively compensated for this disruption without hesitation or instability.

Computational performance. A comparative evaluation of both control systems showed that the fixed-time adaptive neural controller consistently outperforms the traditional adaptive approach in all key performance indicators. The proposed controller provided faster and more predictable orientation while reducing installation time by almost 60% and more accurate angular velocity tracking.

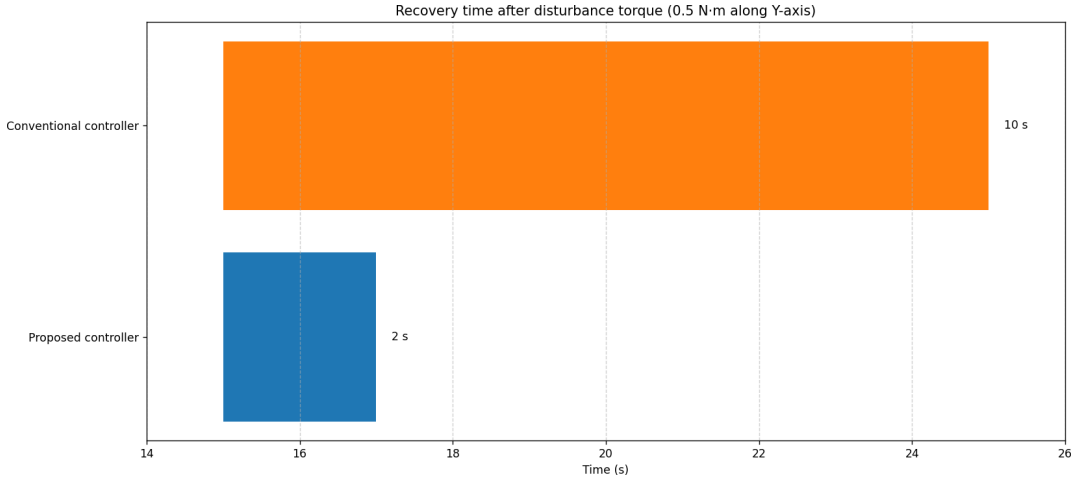


Fig.3 - Timeline chart

Vibration suppression has been significantly improved, the residual deflection has been reduced from 0.15 m to 0.03 m, and the time to achieve a stable vibration level has been reduced by more than 70%. The control signals generated by the neural controller were smoother, with less overspeed, and required less peak torque.

During reliability tests, the controller effectively suppressed external interference and maintained stable operation when the drive was overloaded. The position deviation after interference was reduced from 0.052 rad (at CAC) to 0.018 rad, which confirms the high resistance to interference.

Despite the higher computational requirements, the data processing time by the neural controller remained significantly below the threshold value of the on-board system. This confirms its feasibility for real-time spacecraft applications.

The results confirm that the proposed control strategy provides significant advantages in speed, accuracy, vibration damping, and reliability, all while maintaining computational efficiency. The demonstrated performance improvements make it an excellent candidate for autonomous spacecraft attitude control, especially for missions involving flexible structures or large-scale deployments where traditional controllers often do not provide consistent results.

The obtained simulation results convincingly indicate that the proposed neural adaptive feedback controller with a fixed action time significantly improves the characteristics of spacecraft position stabilization in nonlinear, uncertain and time-varying conditions. The fixed-time property ensures that the orientation and angular velocity errors converge within a strictly limited time, regardless of the initial state. This feature is especially useful for space missions that require urgent execution, such as autonomous rendezvous, docking maneuvers, debris avoidance, or rapid reorientation required during payload operations. Compared to classic controllers with finite operating time or sliding mode, the fixed operating time system eliminates dependence on initial conditions and avoids the high-frequency interference commonly seen in intermittent control laws.

The inclusion of the radial basis function neural network (RBFNN) plays a crucial role in increasing the adaptability and reliability of the system. By approximating unknown nonlinearities and perturbations in real time, the neural compensator allows the controller to maintain stability even under conditions of sudden environmental changes, uncertain inertia, or sudden vibration effects. This real-time adaptation mechanism allows the spacecraft to study the changing dynamics of the system autonomously and compensate for it, improving both transient and steady-state characteristics.

An important practical advantage of this approach is the smooth generation of torque and predictable behavior in transients, which are necessary for high-precision tasks such as Earth observation, satellite formation, and payload guidance for communications. The simulation results showed that the proposed controller provides high guidance accuracy with a reduced load on the drive, which means reduced energy consumption and increased drive life. Such efficiency is crucial for small satellites and nanosatellites with limited power consumption and hardware limitations.

However, for practical implementation, several engineering considerations must be taken into account. Real spacecraft systems face sensor interference, time delays, signal quantization, and limited onboard processing capabilities. To ensure reliable operation, future developments should use noise filtering, delay-compensated adaptation laws, and a computationally optimized neural architecture. Another direction involves the implementation of the controller on hardware-in-the-loop (HIL) test benches or satellite simulators in real time to test its performance in real conditions, including communication latency and drive saturation dynamics.

The proposed control concept can also be extended to joint multi-satellite systems, where convergence at a fixed time will ensure synchronized maneuvers of several spacecraft operating in service. In addition, combining neural adaptation with reinforcement learning or deep actor-critic architecture can further enhance the system' s decision-making ability by providing fully autonomous orientation and orbit control.

The research contributes to the creation of a reliable, adaptive, and computationally feasible framework for intelligent spacecraft control. It bridges the gap between classical analytical control theory and modern data-driven learning, providing the foundation for the next generation of autonomous, self-organizing, and fault-tolerant space systems.

Conclusion. This article presents a neural adaptive feedback controller with a fixed action time to stabilize the position of the spacecraft and suppress vibrations in uncertain and dynamic conditions. The framework combines a neural network with a radial basis function (RBFNN) to compensate for unknown nonlinearities in real time with a fixed-time design that ensures convergence

within a guaranteed boundary, regardless of the initial conditions.

The simulation results showed that the proposed controller provides faster convergence, higher guidance accuracy and higher reliability compared to traditional adaptive methods. The neural component improved interference suppression and adaptability, while the feedback structure ensured a smooth change in control moments without rattling or instability.

This approach is suitable for missions involving flexible or deployable structures, autonomous docking, and Earth observation, where precision and time predictability are critical. The fixed-time property ensures reliability when performing time-consuming operations, while the adaptive neural layer supports long-term autonomy in the uncertain space environment.

Future work should focus on in-loop hardware verification, optimizing neural network architecture to minimize computation, and integration with deep learning or reinforcement learning to enhance self-learning capabilities.

Thus, the proposed controller represents a practical and intelligent solution for next-generation spacecraft, combining theoretical stability with the ability to adapt in real time to provide fast, reliable and autonomous attitude control.

References

1. Yao Q. et al. Neural adaptive fixed-time attitude stabilization and vibration suppression of flexible spacecraft //Mathematics.-2022.Vol.10(10):1667.DOI 10.3390/math10101667.

2. Chen R., Wang Z., Che W. Adaptive sliding mode attitude-tracking control of spacecraft with prescribed time performance //Mathematics. -2022. -Vol.10(3):40. DOI10.3390/math10030401.

3. Zhang G. Et al. Fixed-time sliding mode attitude control of a flexible spacecraft with rotating appendages connected by magnetic bearing //Mathematical Biosciences and Engineering. -2022.-Vol.19(3): 2286-2309. DOI 10.3934/mbe.2022106.

4. Javaid U., Dong H. Disturbance-observer-based attitude control under input nonlinearity //Transactions of the Institute of Measurement and Control. -2021.-Vol.43(10): 2358-2367. DOI 10.1177/0142331221997204.

5. Liu Y. et al. An overview of finite/fixed-time control and its application in engineering systems//IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. -2022.-Vol.9(12):2106-2120. DOI 10.1109/JAS.2022.105413.

6. Li S., Liu K., Liu M. Adaptive Dynamic Programming-Based Spacecraft Attitude Control Under a Tube-Based Framework//Electronics. -2024.-Vol.13(22): 4575. DOI 10.3390/electronics13224575.

7. Wu H., Xu D. Attitude regulation of flexible spacecrafts with unknown control directions and input disturbances //Journal of Systems Science and Complexity.-2024.-Vol.37.-P.2347-2367. DOI 10.1007/s11424-024-3539-8.

8. Lu M. et al. RBFNN-Based Adaptive Fixed-Time Sliding Mode Tracking Control for Coaxial Hybrid Aerial–Underwater Vehicles Under Multivariant Ocean Disturbances //Drones. -2024.-Vol.8(12): 745. DOI 10.3390/drones8120745.

9. Esmaeilzadeh S. M., Zeyghami M. S. Nonlinear finite time attitude control of flexible spacecraft based on a novel output redefinition method //Chinese Journal of Aeronautics. -2023.-Vol.36(11). -P.373-385. DOI 10.1016/j.cja.2023.08.001.

10. Liu F., Yao X., Liu Y. Adaptive neural network control of multiple-sectioned flexible riser with time-varying output constraint and input nonlinearity //Asian Journal of Control. -2023.-Vol.26(2). -P.917-930.DOI 10.1002/asjc.3231.

11. Efimov D. Et al. Finite-time stability tools for control and estimation //Foundations and Trends in Systems and Control. -2020. Vol.9(2-3): 171-364. DOI 10.1561/2600000026.

12. Post M. A., Yan X. T., Letier P. Modularity for the future in space robotics: A review //Acta Astronautica. -2021.-Vol.189.-P.530-547. DOI 10.1016/j.actaastro.2021.09.007.

13. Liu Z. Et al. Dual-condition event-triggered distributed adaptive neural control for multi-agent systems with nonlinear fault //Journal of the Franklin Institute. -2022.-Vol.359(14). -P.7393-7414. DOI 10.1016/j.jfranklin.2022.07.026.

14. You Z. Et al. Adaptive neural network vibration suppression control of flexible joints space manipulator based on H∞ theory//Journal of Vibroengineering. -2023.-Vol.25(3). -P.492-505. DOI 10.21595/jve.2022.22797.

15. Cao T., Gong H., Han B. Observer-Based Predefined-Time Attitude Control for Spacecraft Subject to Loss of Actuator Effectiveness//Processes. -2022.-Vol.10(11): 2294. DOI 10.3390/pr10112294.

16. Matessa M. Algorithms for encoding interstellar messages//Acta Astronautica. -2025. -Vol.229: 161-165. DOI 10.1016/j.actaastro.2025.01.011.

17. Czornik A. et al. Some conditions for the proportional local assignability of the Lyapunov spectrum of discrete linear time-varying systems //Automatica. -2022.-Vol.144: 110458. DOI 10.1016/j.automatica.2022.110458.

18. Chen W., Hu Q. Sliding-mode-based attitude tracking control of spacecraft under reaction wheel uncertainties //IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. -2023.-Vol.10(6): 1475-1487. DOI 10.1109/JAS.2022.105665.

19. Kong X. Et al. Predefined-Time Control of a Spacecraft Attitude with Thrust Booms //Aerospace. -2023.-Vol.10(2): 94. DOI 10.3390/aerospace10020094.

20. Bima A. I. H. et al. Integrative system biology and mathematical modeling of genetic networks identifies shared biomarkers for obesity and diabetes //Mathematical Biosciences and Engineering. -2022.-Vol.19(3): 2310-2329. DOI 10.3934/mbe.2022107.

21. Liu M. Et al. Adaptive dynamic programming-based fault-tolerant attitude control for flexible spacecraft with limited wireless resources//Science China Information Sciences. -2023.-Vol.66: 202201. DOI 10.1007/s11432-022-3732-9.

22. Gao Y. Et al. Fault deviation estimation and integral sliding mode control design for Lipschitz nonlinear systems //Systems & Control Letters. -2019.-Vol.123.-P.8-15. DOI 10.1016/j.sysconle.2018.08.006.

23. Guo Q. Et al. Neural adaptive backstepping control of a robotic manipulator with prescribed performance constraint //IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. -2019.-Vol.30(12). -P.3572-3583. DOI 10.1109/TNNLS.2018.2854699.

24. Lunghi P. Et al. Energy efficiency analysis of Spiking Neural Networks for space applications//Astrodynamics. -2025.-Vol.9(6). -P.909-932. DOI 10.1007/s42064-024-0256-y.

25. Dai X. Et al. Mechanical behaviors of inner and outer sidewalls of honeycomb cores subjected to out-of-plane compression //Aerospace Science and Technology. -2022.-Vol.127:107659. DOI 10.1016/j.ast.2022.107659.

26. Abdiramanov O. Et al. Self-Organizing Control Systems for Nonlinear Spacecraft in the Class of Structurally Stable Mappings //International Journal of Advanced Computer Science and Applications. -2023.-Vol.14(11). -P.786-792. DOI 10.14569/ijacsa.2023.0141179.

27. Beisenbi M. Et al. Control of deterministic chaotic modes in power systems //IEEE. -2023.DOI

10.1109/SIST58284.2023.10223493.

Information about authors

Beisenbi M.A. - Doctor of Technical Sciences, Professor, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: beisenbi@mail.ru;

Abdiramanov O.G. - PhD student, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: risbajbdiramanov@gmail.com;

Rakhimzhanova M.B. - PhD, Assistant Professor Astana IT University, Astana, Kazakhstan, e-mail: rakhimzhan.mira@gmail.com;

Balgozhina G.B. - doctoral student, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty Kazakhstan, e-mail: balgulmira300982@gmail.com;

Shuteyeva G.S. - PhD, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, e-mail: g.shuteyeva@astanait.edu.kz

Zhamangarin D.S. - PhD, associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: enu_1@enu.kz.

Сведения об авторах

Бейсенби М.А. - д.т.н., профессор, Евразийский Национальный университет им. Л.Н.Гумилёва, Астана, Казахстан, e-mail: beisenbi@mail.ru;

Әбдіраманов Ө.Ғ. - докторант, Евразийский Национальный университет им. Л.Н.Гумилёва, Астана, Казахстан, e-mail: risbajbdiramanov@gmail.com;

Рахимжанова М.Б. - PhD, асс.профессор, Astana IT University, Астана, Казахстан, e-mail: rakhimzhan.mira@gmail.com;

Балгожина Г.Б. - докторант, Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан, e-mail: balgulmira300982@gmail.com;

Шутеева Г.С. - PhD, Astana IT University, Астана, Казахстан, e-mail: g.shuteyeva@astanait.edu.kz;

Жамангарин Д.С. - PhD, асс. профессор, Евразийский Национальный университет им. Л.Н.Гумилёва, Астана, Казахстан, e-mail: enu_1@enu.kz.

ҒТАМР 50.41.25 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1278**

RUBERT-ДИАГНОСТИКАСЫ ЖӘНЕ IRT-АДАПТИВТІ ТЕСТІЛЕУ НЕГІЗІНДЕ SQL ЖЕКЕЛЕНДІРІЛГЕН ОҚЫТУ

[1]Б.Ж. Жарлықасов, [2]Г.М. Баенова, [1]Қ.С. Мауленов, [2]А.М. Сыздыкова
[1]Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай, Қазақстан,
[2]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Корреспондент-автор: aierke91@mail.ru

Білім беру технологиялары мен оқу процесінде цифрлық платформалар және орталар ажырамас бөлікке айналуда. Оқу материалдары мен тапсырмалар білім алушыларға цифрлық форматта дайындалып ұсынылғандықтан, ол білім алу және оқыту процесіне елеулі өзгерістер енгізуде. Бұл өзгерістер тек цифрлық форматтағы оқыту әдістеріне ғана емес, сонымен қатар білімді бағалауға да қатысты.

Осы жұмыста SQL тілін қолдауға арналған кешенді жасанды интеллект жүйесі ұсынылған. Ол үш негізгі компонентті біріктіреді: RUBERT моделіне негізделген студенттердің қателерін түрлері бойынша жіктеу модулі, XGBoost алгоритміне негізделген ұсынымдық модуль бұл студенттердің қателер профилі мен жұмыс қарқынына сүйене отырып қайталау тақырыбын анықтайды, тапсырмаларға жауап беру теориясының (IRT) екі параметрлі моделін қолданатын бейімделгіш тестілеу жүйесі, ол білім алушының ағымдағы қабілет деңгейіне сәйкес сұрақтардың күрделілігін динамикалық түрде таңдайды. Жүйе веб-қосымша түрінде жүзеге асырылған және «Ақпараттық жүйелер» бағытындағы 120 студенттің: SQL логтары, теориялық сұрақтарға жауаптары және тест тапсырудың уақыт белгілері сияқты деректер негізінде оқу қосымшасы (2024 жылдың қыркүйегі мен 2025жылдың мамыры аралығында) қолдану барысында сыналды.

Түйін сөздер: цифрлық оқыту платформалары, жасанды интеллект, машиналық оқыту, оқыту модельдері, бағалау көрсеткіштері.

ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЕ ОБУЧЕНИЕ SQL НА ОСНОВЕ RUBERT-ДИАГНОСТИКИ И IRT-АДАПТИВНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ

[1]Б.Ж. Жарлыкасов, [2]Г.М. Баенова, [1]К.С. Мауленов, [2]А.М. Сыздыкова
[1]Костанайский региональный университет им. Ахмет Байтұрсынұлы, Костанай, Казахстан,
[2]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
e-mail: aierke91@mail.ru

В образовательных технологиях и учебном процессе цифровые платформы и среды стали неотъемлемой частью. Учебные материалы и задания оформляются и предоставляются обучающимся в цифровом формате, что внесло существенные изменения в процесс обучения и освоения знаний. Эти изменения касаются не только методов обучения в цифровом формате, но и проверки знаний.

В работе представлена комплексная ИИ-система поддержки обучения SQL, которая объединяет три ключевых компонента: классификация студенческих ошибок по типам, основанная на модели RuBERT, рекомендательный модуль на XGBoost для выбора тем повторения на основе профиля ошибок и темпа работы, и адаптивное тестирование с применением двухпараметрической модели теории ответов на задания (IRT), позволяющее динамически подбирать сложность вопросов под текущую оценку способности обучаемого. Система реализована в виде веб-приложения и протестирована на данных 120 студентов направления «Информационные системы», собранных в ходе естественного использования учебного приложения (сентябрь 2024 – май 2025): SQL-логи, ответы на теоретические вопросы и временные метки прохождения тестов.

Ключевые слова: цифровые обучающие платформы, искусственный интеллект, машинное обучение, модели обучения, метрики оценки.

PERSONALIZED SQL TRAINING BASED ON RUBERT DIAGNOSTICS AND IRT-ADAPTIVE TESTING

[1]B.Zh. Zharlykassov, [2]G.M. Baenova, [1]K.S. Maulenov, [2]A.M. Syzdykova

[1]Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay, Kazakhstan,
[2]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
e-mail: aierke91@mail.ru

Digital platforms and environments have become an integral part of educational technologies and the learning process. Learning materials and assignments are designed and provided to students in digital format, which has made significant changes to the process of learning and acquiring knowledge. These changes concern not only digital teaching methods but also knowledge testing.

The paper presents a comprehensive AI-based SQL training support system that combines three key components: a classification of student errors by type based on the RuBERT model, an XGBoost-based recommendation module for selecting revision topics based on error profile and work pace, and adaptive testing using a two-parameter item response theory model (IRT), allowing dynamic adjustment of the complexity of questions to the current assessment of the student' s ability. The system is implemented as a web application and tested on data from 120 students majoring in Information Systems, collected during their natural use of the learning application (September 2024 - May 2025): SQL logs, answers to theoretical questions, and timestamps of passing tests.

Keywords: digital learning platforms, artificial intelligence, machine learning, learning models, assessment metrics.

Кіріспе. Жоғары білім берудің цифрландырылуы нәтижесінде электрондық білім беру ортасы мен оқытуды басқару жүйелері (LMS) университеттердің негізгі инфрақұрылымына айналды. Оқу материалдары, тапсырмалар мен бақылау іс-шаралары бүгінде цифрлық форматта дайындалады және өткізіледі, ал оқу қызметі туралы жинақталған деректер оқытудың моделін дәлірек құруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, күнделікті операцияларды автоматтандыруға және жекелендіру мүмкіндіктерін кеңейтуге қабілетті жасанды интеллект әдістері қарқынды дамып келеді. Интеллектуалды платформаның негізі ретінде «Деректер базасы» пәні таңдалды. Себебі біріншіден, бұл пән - IT мамандарын даярлаудың және пәнаралық бағдарламалардың (деректер аналитикасы, ақпараттық жүйелер, киберқауіпсіздік, бағдарламалық қамтамасыз ету инженериясы) іргелі құрамдас бөлігі болып табылады, екіншіден, мақала авторлары осы пәнді өз университеттерінде оқытады.

Транзакциялық жүйелер мен электрондық коммерциядан бастап, аналитикалық витриналар мен шешім қабылдауды қолдау жүйелеріне дейін деректер базалары қазіргі цифрлық экономиканың негізін құрайды. Негізгі құзыреттерге реляциялық модельді түсіну, схемаларды жобалау, нормализациялау, SQL тілін меңгеру, транзакциялар мен блокировкалар механизмдері, индекстеу және сұраныстарды оңтайландырудың негізгі қағидаттары жатады. Аталған тақырыптарды игеру сапасы түлектердің қолданбалы міндеттерді шешу қабілетіне тікелей әсер етеді, ал университеттер үшін білім беру бағдарламаларының өзектілігін және студенттердің академиялық табыстылығын қамтамасыз ету тұрғысынан маңызды.

«Деректер базасы» пәні магистратураға қабылдау емтихандарында ерекше орын алады. Емтихандар мен біліктілік тесттері тек теориялық білімді ғана емес, сонымен қатар практикалық дағдыларды да тексереді: яғни дұрыс SQL-сұраныстарын құра білу, тапсырма шектеулеріне сәйкес деректер құрылымын жобалау, орындау жоспарларын талдау және қателердің көздерін анықтау қабілеттерін бағалайды. Алайда дәстүрлі бақылау түрлері (жауап нұсқасын таңдау, терминдерді білуге арналған тапсырмалар) жобалау және аналитикалық ойлау дағдыларының қалыптасу деңгейін толық көрсете

алмайды. Сондықтан әдістемелік міндет туындайды: теориялық білімді тексеруді практикалық дағдыларды диагностикалаумен ұштастыру, сондай-ақ студентке тақырыптар бойынша олқылықтарды көрсететін мазмұнды кері байланыс ұсыну. Дегенмен, білім беру саласында жасанды интеллектке деген қызығушылықтың артуына қарамастан, деректер базаларын оқыту саласы әлі де жеткілікті зерттелмеген. Әсіресе, адаптивті оқыту мен студенттердің қателіктерін талдау контексі бағыттында зерттеулер аз [1, 2]. Бұл жағдай нақты білім беру міндеттерін ескере отырып, SQL оқыту процесіне жасанды интеллект технологияларын интеграциялауға бағытталған қолданбалы шешімдерге деген қажеттілікті арттырады.

Іс жүзінде LMS (мысалы, Moodle) және жаппай ашық білім беру платформалары (мысалы, OpenEdu) контентті басқару, кесте құру, негізгі есеп беру және қолжетімділік мәселелерін тиімді шешеді. Дегенмен, «Деректер базасы» пәні үшін мұндай құралдар бірқатар себептерге байланысты жеткіліксіз болып табылады.

Біріншіден, стандартты конфигурациядағы тестілер негізінен дұрыс жауапты тануға бағытталған, яғни шешімді қайта жасаудың және құрудың орнына, дұрыс жауапты тану қабілетін (яғни «тану» түріндегі тексеруді) бағалайды. Бұл үстірт оқыту стратегиясын және іздеу әрекетін (ұсынылған материалдардан жауапты тез табу дағдысын) қалыптастырады, бірақ сұраныстарды дұрыс құра білу және олардың дұрыстығын түсіндіру қабілетін дұрыс бағаламайды. SQL-ді тексеруге арналған плагиндер болса да, оларды енгізу жеке баптауды, тапсырмалар мен тестілік базалардың сапалы жиынтығын, сондай-ақ нақты тәжірибеде әрдайым жүзеге асырыла бермейтін әдістемелік қолдауды қажет етеді.

Екіншіден, қолданыстағы тестілеу модульдері көбіне ішкі тақырыптар деңгейінде диагностикалық талдау ұсынбайды: оқытушыларға топтың нақты қай тұста қиналып жатқанын (мысалы: JOIN, агрегаттау, ішкі сұраулар, терезелік функциялар) тез анықтау қиын, ал студент қателердің себептері жөнінде егжей-тегжейлі түсіндірмелер мен жеке ұсыныстарға қол жеткізе алмайды. Сонымен бірге, кері байланыс көбінесе екілік сипатта болады (дұрыс/бұрыс) және кезең-кезеңмен түсіндіру механизмін қамтымайды. Бұл бақылаудың педагогикалық құндылығын төмендетіп, қателерді түзету циклін ұзартады.

Үшіншіден, шектеулі адаптивтілік: оқыту траекториясы белгілі бір студенттің қателіктерінің профиліне нашар бейімделеді, білімнің қазіргі жағдайына байланысты тапсырмалардың күрделілігі мен форматын автоматты түрде реттеу мүмкіндігі жоқ. Жаппай платформалар (соның ішінде OpenEdu курстары да) көбінесе жеке диагностика мен олқылықтарды кезең-кезеңімен түзетуге емес, мазмұн мен қорытынды бағалауға бағытталған. Нәтижесінде цифрлық ортаның мүмкіндіктері мен пәннің нақты қажеттіліктері арасында алшақтық пайда болады, мұнда дұрыс шешімдерді құру қабілетін сыни тұрғыдан бағалау қажет.

SQL-сұраныстарды автоматтандырылған тексеру бойынша жүргізілген зерттеулерде сұраныстар сапасын бағалаудың әртүрлі тәсілдерін қарастырады. Бір тәсіл SQL-сұраныстарды ішінара бағалауды (partial SQL query assessment) зерттейді, бұл тек ”дұрыс/қате” деп қана анықтауға емес, сонымен қатар эталондық нұсқамен құрылымдық ұқсастық деңгейін бағалауға мүмкіндік береді. Тағы бір тәсіл SQL-ді автоматты түрде бағалау үшін назар аудару механизмі бар конволюциялық нейрондық желілерді пайдалануға негізделген [3, 4]. Бұл зерттеулер осы жұмыста ұсынылған жүйе сәйкес келетін тақырыптың өзектілігі мен белсенді дамуын көрсетеді.

Интернет дәуірі мен тілдік модельдердің кеңінен қолжетімділігі жаңа қиындықтарды алдыңғы қатарға шығарды. Білім берудегі жасанды интеллект оқыту үдерісін түбегейлі түрлендіре алады: {ол білім алушыларға жекелендірілген оқу материалдарын, автоматтандырылған кері байланысты және адаптивті бағалау жүйелерін ұсына отырып, оқу стратегияларын, оқыту сапасын және жалпы білім нәтижелерін жақсартуға мүмкіндік береді [5]. Жасанды интеллект өзінің айтарлықтай әлеуетіне қарамастан, когни-

тивтік парадоксқа да ие: ол оқу процесін жетілдіріп қана қоймай, сонымен қатар білім алушылардың когнитивтік қабілеттерін, әсіресе сыни тұрғыдан ойлау мен мәселелерді шешу дағдыларын әлсіретуі де мүмкін [6]. Сондықтан жасанды интеллект технологияларын енгізу сақтықты, әрі ойластырылған әдіс-тәсілдерді талап етеді, сонымен қатар басты назарды тек рутиналық процестерді автоматтандыруға емес, жоғары деңгейлі когнитивтік дағдыларды дамытуға бағыттаған дұрыс. Технологияға шамадан тыс тәуелділікті болдырмау үшін автоматтандырылған қолдау мен тәуелсіз танымдық қабілеттерді дамыту арасындағы тепе-теңдікті сақтау маңызды болып табылады [7].

Бір жағынан, студенттер код үлгілеріне және дайын SQL фрагменттеріне жылдам қол жеткізу мүмкіндігіне ие, бұл олардың оқу үдерісін едәуір жеделдетуге мүмкіндік береді. Екінші жағынан, студенттердің өздігінен ойлау қабілетінің механикалық көшірумен алмастырылу қаупі артып, деректер схемасын талдау, тұтастық шектеулерін түсіну және нәтиженің дұрыстығын бағалау талап етілетін тапсырмаларға төзімділіктің төмендеуіне алып келеді. Оқытушылар үшін бұл формальды тұрғыдан дұрыс, бірақ тұжырымдамалық жағынан қате шешімдерді ажырату қажеттілігі туындайды. Сондай-ақ академиялық адалдықты сақтау, бағалау критерийлерін айқын ету және практикалық дағдыларды дамытуға бағытталған құралдарға деген сұранысқа алып келеді [8].

Осылайша, жаппай цифрлық платформалардың ыңғайлылығы мен «Деректер базасы» пәнінің тақырыптары бойынша терең диагностика жүргізу қажеттілігі арасында зерттеу мен әдістемелік алшақтық байқалады. Қолданыстағы LMS жүйелерінде келесі мүмкіндіктер жеткіліксіз:

- жеке тақырыпшалар деңгейінде түсіндірілетін кері байланыс;

- студенттің профиліне тапсырманың күрделілігі мен форматын бейімдеу;

- тақырыптық «олқылықтарды» жедел анықтауға және курсқа мақсатты түзетулер енгізуге мүмкіндік беретін оқытушыларға арналған аналитикалық жүйелер.

Қосымша шектеу ол сапалы тест базаларын қолмен әзірлеуге және типтік қателіктерді талдауға арналған ресурстық шығындар болып табылады.

Осы міндеттерге жауап ретінде «Деректер базасы» пәні үшін жасанды интеллект негізіндегі қателерді жіктеу моделі және жеке ұсыныстар жүйесімен интеграцияланған интеллектуалды оқыту көмекшісі ұсынылады. Дәстүрлі тесттік модульдерден айырмашылығы, жүйе тек жауаптарды бағалап қана қоймайды, түсіндірмелі кері байланыс береді, жеке қайталау траекторияларын қалыптастырады және әлсіз тақырыптарды (мысалы, қате қосылулар, агрегаттау немесе фильтрациядағы қатені) анықтайды. Ал оқытушы үшін тақырыптар мен топтар бойынша аналитикасы бар жинақталған есептер қолжетімді болады. Бұл күнделікті талдауға кететін уақытты үнемдеп, жетекшілікке арналған ресурстарды арттырады.

Ұсынылған тәсіл инженерлік іске асыруды (тестілеу модулі бар веб-қосымша) және зерттеу құрамдас бөліктерін (қателер классификаторын оқыту және бағалау, тақырыптар бойынша дәлдік/толықтық көрсеткіштерін талдау, түсіндірмелі кері байланыстың оқу нәтижелеріне әсерін зерттеу) біріктіреді. Ғылыми тұрғыдан алғанда, маңыздысы - бағалау процедураларының қайталануы, деректер мен көрсеткіштердің айқындығы, сондай-ақ этикалық аспектілер - құпиялылық, ақпараттандырылған келісім, модельдің ықтимал ауытқуларын аудиті [9].

Практикалық жағынан, жүйе студенттердің ағымдағы бақылауға және магистратураға түсу емтихандарына дайындық кезінде мүмкіндіктерін арттыруға, сондай-ақ рутиналық тапсырмаларды автоматтандыру және бақылаудың диагностикалық мүмкіндіктерін жақсарту арқылы оқытушылардың жүктемесін азайтуға бағытталған.

Материалдар мен әдістер. Жүйенің архитектурасы мен жобалануы. Жүйе мобильді

бейімделуі бар веб-қосымша түрінде жүзеге

асырылған. Фронтенд React (TypeScript) тілінде жазылған, бэкенд – Node.js, ML қызметтері - Python (Flask) және PyTorch кітапханасын пайдалану арқылы жүзеге асырылған. Логтар мен тест нәтижелерін сақтау үшін PostgreSQL деректер қорын басқару жүйесі (ДҚБЖ) қолданылған, кэш үшін - Redis пайдаланылды. Модельдерді оқыту NVIDIA Tesla K20 GPU-мен және 112 ГБ оперативті жады бар серверде жүргізілген.

Тестілік модуль. Сұрақтар банкі SQL тақырыбы бойынша 250 тапсырма енгізілген:

- DML операциялары (SELECT, INSERT, UPDATE);

- JOINS (INNER, LEFT, RIGHT, FULL);

- Агрегация (GROUP BY, HAVING, терезелік функциялар);

- теориялық сұрақтар (нормализация техникасы, индекстер).

Әрбір тапсырмаға дұрыс шешім үлгісі және типтік қателер сипаттамасы берілген.

Қателер андатпасы және іріктеулерді дайындау.

Қолданушының енгізген SQL - сұраныстары мен ДҚБЖ қателер туралы хабарламалары логтар арқылы автоматты түрде жиналды. Үш оқытушыдан тұратын сараптамалық топ 5000 қателік мысалын келесі категориялар бойынша қолмен бөліп белгіледі:

- синтаксистік қателер (кілттік сөздердің жетіспеушілігі, элементтердің дұрыс емес реті);

- семантикалық қателер (деректер кестесін / өрісін дұрыс таңдамау);

- логикалық (JOIN шарттарындағы немесе агрегаттық функциялардағы қателер).

Деректер оқыту (80%), валидация (10%) және тестілеу (10%) үлгілеріне бөлінді.

Жауаптарды талдау моделі.

Қателерді жіктеу үшін BERT-based (RUBERT) моделі қолданылып, SQL-логтар корпусында қайта оқытылды:

- кілт сөздер мен идентификаторларды ескере отырып, SQL сұрауларын токенизациялау;

- BERT-ті fine-tuning бір толық байланысқан қабатпен (hidden_size=768);

- AdamW оптимизаторы, learning rate=2e-5, batch_size=16.

Сапаны бағалау: әрбір қателік категориясы бойынша precision, recall және F1-score.

Ұсынымдық модуль.

Классификация нәтижелері мен студенттің үлгерім профилі негізінде, ең күрделі тақырыптарды болжау үшін градиентті бустинг (XGBoost) модулі жүзеге асырылды. Модельде келесі белгілер қолданылды:

- әр санат бойынша қателіктердің жиілігі;

- орташа жауап беру уақыты;

- ұқсас тапсырмаларды орындау тарихы.

Модель 80/10/10 белгілері бойынша оқытылды.

Адаптивті тестілеу.

Адаптивтілік Item Response Theory (IRT) екі параметрлі логистикалық моделіне негізделген алгоритммен қамтамасыз етілді:

$$P(\theta) = \frac{1}{1 + e^{-a_i(\theta - b_i)}} \quad (1)$$

Мұндағы a_i - дискриминация параметрі, b_i - сұрақтың күрделілік деңгейі, θ - студент қабілетінің көрсеткіші. a_i және b_i параметрлері максималды ықтималдық әдісімен оқыту деректер жиынында бағаланды. Әр жауаптан кейін жүйе студенттің ағымдағы қабілет деңгейін θ қайта есептеп, соған сәйкес күрделігіне оңтайлы келесі сұрақты таңдап отырады. Алынған параметрлер арқылы IRT тәсілінің онлайн оқыту жүйелерінде тиімді қолдануға болатындығын көрсетті, бұл Choi мен McClenen еңбектерінде де атап өтілген [10].

Тиімділікті бағалау.

Оқу үлгерімінің жақсаруы туралы гипотезаны тексеру үшін студенттер екі топқа бөлінді - эксперименттік және бақылау топтары (әрқайсысы 60 студенттен).

- бақылау тобы: статикалық тесттілер банкін;

- эксперименттік топ: жасанды интеллект

негізіндегі кері байланысы бар бейімделетін тестілеу.

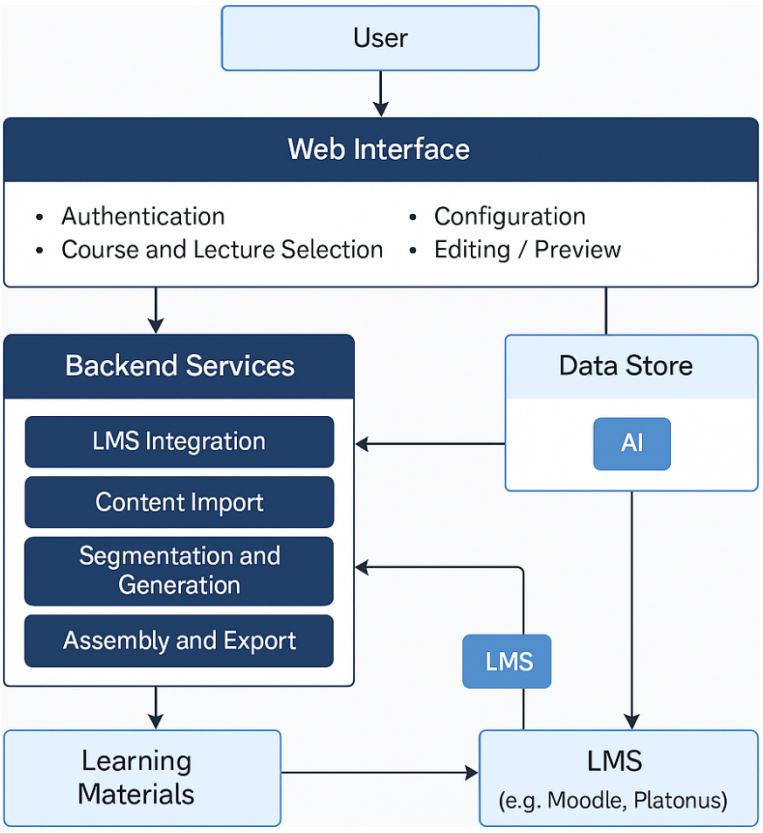
Орташа баллдардың айыршылығы Student t-критерийі ($p<0,05$) арқылы анықталды. Сонымен қатар, студенттердің қанағаттану деңгейі SUS (System Usability Scale) сауалнамасы арқылы жинақталды [11,12].

Аппараттық-бағдарламалық платформа.

TestGen атты бақылау тесттерін автоматты түрде генерациялау жүйесі таратылған аппараттық-бағдарламалық платформа негізінде құрылған. Ол есептеу ресурстарын, деректерді сақтау жүйесін және бағдарламалық қызметтер кешенін біріктіреді. Есептеу кластерінің өзегін Intel Xeon процессорлары мен NVIDIA Tesla K20 графикалық үдеткіштері бар серверлер құрайды. Бұл құрылғылар машиналық оқыту және табиғи тілді генерациялау операцияларын жоғары өнімділікпен орындауға мүмкіндік береді.

Бағдарламалық бөлік микросервистік архитектура қағидаттарымен әзірленіп, Kubernetes ортасында орналастырылған. Мұндай шешім жүйенің масштабталуын, тұрақтылығын және қызметтердің оқшауланuын қамтамасыз етеді. Docker контейнеризациясы әрбір компонентті жеке басқаруға мүмкіндік береді: контентті импорттау және түрлендіру модулі, табиғи тілді өңдеу қызметтері, LLM-воркерлері, деректердің қайталануын бақылау және сапаны қамтамасыз ету жүйесі, тестілерді жинақтау және экспорттау модулі. Компоненттердің өзара әрекеттесуі API шлюзі және Redis хабарлама жүйесі арқылы жүзеге асады, бұл жүктемені тиімді теңестіруге мүмкіндік береді.

Осылайша, TestGen платформасы жоғары өнімді есептеу инфрақұрылымын, заманауи контейнерді басқару құралдарын және модульдік микросервистік архитектураны үйлестіре отырып, электронды оқыту жүйелеріне арналған тест тапсырмаларын автоматты генерациялау міндетін тиімді шешуге мүмкіндік береді.



1-сурет. TestGen бақылау тестілерін автоматты түрде генерациялау жүйесінің жалпы архитектурасы

1-суретте оқыту платформаларына (мысалы, Moodle және Platonus) интеграциялауға бағытталған TestGen автоматтандырылған бақылау тестілерін генерациялау жүйесінің жалпыланған архитектурасы берілген. Архитектура төрт деңгейден тұрады:

1. Пайдаланушы деңгейі - оқытушы жүйемен веб-интерфейс арқылы әрекеттеседі. Бұл деңгейде аутентификация жүргізіледі, курс пен дәрістер таңдалады, тест параметрлері бапталады, сондай-ақ генерацияланған тапсырмаларды өңдеу және алдын ала қарау мүмкіндігі беріледі.

2. Веб-интерфейс - пайдаланушы мен ішкі сервистер арасындағы байланысты қамтамасыз етеді. Ол параметрлерді жинауға, тапсырмалардың орындалу күйін көрсетуге және өңдеу құралдарын ұсынуға жауап береді.

3. Сервистік деңгей (Backend Services)- келесі негізгі құрамдас бөліктерден тұрады:

- LMS Integration – оқу үдерісін басқару жүйелерімен (Moodle/Platonus) өзара әрекеттесуді қамтамасыз ететін модуль, ол дәрістерді автоматты түрде импорттауға және тесттерді экспорттауға мүмкіндік береді.

- Content Import – әр түрлі форматтағы (PDF, DOCX, PPT, HTML) оқу материалдарын жүктеуге және түрлендіруге мүмкіндік береді.

- Segmentation and Generation – материалдарды мағынасына сай блоктарға бөледі және олардың негізінде жасанды интеллект модельдерінің көмегімен тест сұрақтарын генерациялайды.

- Assembly and Export – ең тиімді сұрақтарды таңдайды, тапсырмалар банкін қалыптастырады және оны Moodle XML форматында немесе тікелей LMS жүйесіне экспорттайды.

4. Сыртқы жүйелер мен деректер қоймалары:

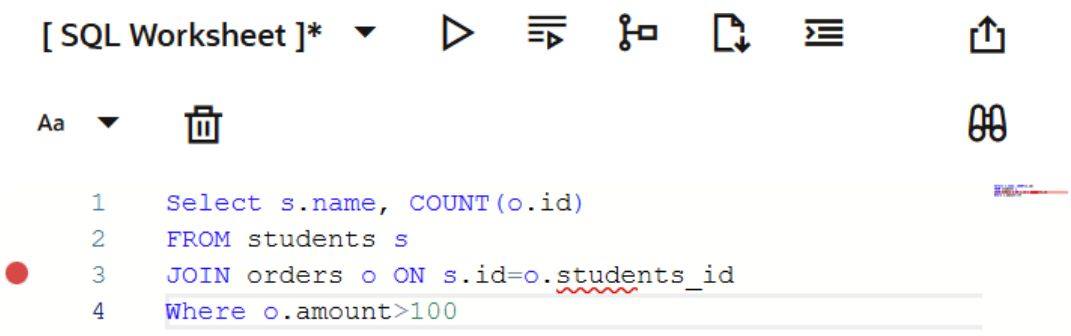
- Data Store (PostgreSQL, Object Storage, Redis) – бастапқы файлдарды, мәтін сегменттерін, эмбеддингтерді, генерацияланған сұрақтар мен метадеректерді сақтау үшін қолданылады.

- AI ішкі жүйесі - сұрақтарды генерациялау және олардың сапасын талдау модельдерінің жұмысын қамтамасыз етеді.

- LMS (Moodle, Platonus) – дайын тесттерді оқу курстарына орналастыруға арналған соңғы орта болып табылады.

Сызбадағы деректер ағындары оқу материалдарын жүктеуден бастап, оларды өңдеу, сұрақтарды генерациялау және дайын тесттерді LMS жүйесіне жариялау кезеңіне дейінгі ақпарат қозғалысын бейнелейді.

Ұсынылған жүйенің практикалық қолданылуын көрсету үшін эксперименттік топтағы нақты жағдайдың мысалын келтіреміз. Студентке агрегаттық функциялар мен кестелерді біріктіруді қолдануға арналған тапсырма берілді.2-суретте келесі SQL-сұранысы көрсетілген:



2-сурет. Студенттің SQL сұрауындағы қатені анықтау мысалы

Жүйе қате түрін автоматты түрде анықтайды және тақырыптық ұсыныс жасайды. Бұл жағдайда қате өріс атауына (student_id орнына students_id қате өріс атауы) байланысты семантикалық қате анықталды.

Нәтижелер және талқылау. Қателерді клас-

сификациялау сапасы. RUBERT моделі үш негізгі қате санатын жіктеу барысында жоғары дәлдік көрсеткіштерін көрсетті. F1-score ең үлкен көрсеткіші логикалық қателерді тану болып табылады, бұл JOIN және агрегаттық функциялардың дұрыс емес шарттарын дұрыс анықтау үшін өте маңызды (1-кесте).

1 - кесте. RuBERT моделі бойынша қателіктерді жіктеу сапасының көрсеткіштері

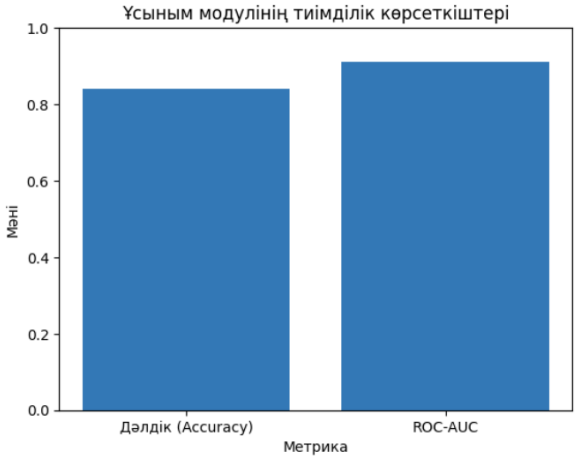
Қателер категориясы	Precision	Recall	F1-score
Синтаксистік	0,91	0,88	0,89
Семантикалық	0,87	0,85	0,86
Логикалық	0,89	0,90	0,90

1-кестеде үш негізгі қате санатын жіктеу кезінде ruBERT моделі бойынша жоғары көрсеткіштер ұсынылған.

Қате санаттары бойынша F1-score мәндері 3-суретте график түрінде де көрсетілген, бұл қате түрлері арасындағы айырмашылықтарды көрнекі түрде бағалауға мүмкіндік береді.



3-сурет. Қате санаттары бойынша F1-score мәндері



4-сурет. Ұсыным модулінің Accuracy және ROC-AUC көрсеткіштері

Ұсынымдық модулінің тиімділігі.

XGBoost негізіндегі ұсыным жүйесі қайталап оқытуды қажет ететін ең өзекті үш негізгі тақырыпты жоғары дәлдікпен болжайды.

Модельдің ROC-AUC және дәлдік (accuracy) көрсеткіштері төменде 2 кестеде көрсетілген.

2 - кесте. XGBoost негізіндегі ұсыныс модулінің сапа көрсеткіштері

Көрсеткіштер	Мәні
Accuracy	0,84
ROC-AUC	0,91

Ұсыным модулінің тиімділік көрсеткіштері 4-суретте толығырақ көрсетілген.

Қанағаттану деңгейін бағалау (SUS)

Курсты аяқтағаннан кейін қатысушылар екі топқа бөлінді.3-кестеде көрсетілгендей, ЖИ-негізіндегі кері байланысы бар адаптивті тестілеуді пайдаланған эксперименттік топ бақылау тобына қарағанда айтарлықтай жақсы нәтиже көрсетті.

3 - кесте. Бақылау және эксперименттік топтардың көрсеткіштері

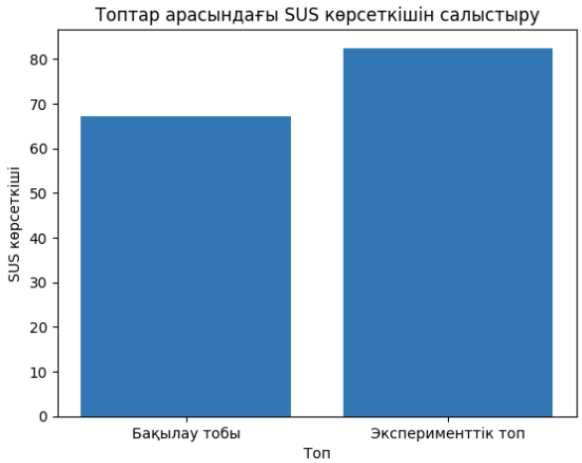
Топ	Орташа балл дейін (%)	Орташа балл кейін (%)	Жақсару
Бақылау	64,3	68,1	3,8
Эксперименттік	63,8	81,6	17,8

System Usability Scale шкаласы бойынша қатысушылар жүйенің ыңғайлылығы мен пайдалылығын бағалады. Эксперименттік топ пайдаланушылық тәжірибенің айтарлықтай артқанын атап өтті (4-кесте).

4 - кесте. SUS шкаласы бойынша қанағаттану деңгейі

Көрсеткіш	Бақылау тобы	Эксперименттік топ
SUS-score (0 –100)	67,2	82,5

Эксперименттік және бақылау топтарының SUS орташа мәндерінің айырмашылығы 15,3 балды құрады және бұл айырмашылық статистикалық тұрғыдан маңызды ($p < 0,05$). Бақылау және эксперименттік топтардағы пайдаланушылық тәжірибені салыстыру нәтижелер 5-суретте көрсетілген.



5-сурет. Бақылау және эксперименттік топтардағы SUS көрсеткішін салыстыру

Стандартты LMS жүйелерінен айырмашылығы (мысалы, Moodle), онда тестілеу көбінесе статикалық сипатта болып, тек бинарлық бағалаумен (дұрыс/бұрыс) шектелетін болса, ұсынылған жүйе келесі мүмкіндіктерді қамтамасыз етеді:

- қате түрлерін автоматты түрде жіктеу;
- жекелендірілген ұсыныстар беру;
- күрделілік деңгейін адаптивті реттеу (IRT);
- ішкі тақырыптар бойынша аналитикалық панель.

5-кестеде функционалдық сипаттамаларды салыстыру келтірілген.

5 - кесте. Ұсынылған жүйені дәстүрлі LMS-пен салыстыру

Сипаттама	Дәстүрлі LMS	Ұсынылған жүйе
Қате түрлерін диагностикалау	Жоқ	Иә (ruBERT)
Жекелендірілген ұсыныстар	Шектеулі	Иә (XGBoost)
Күрделіліктің адаптивтілігі	Жоқ	Иә (IRT)
Ішкі тақырыптық аналитика	Ішінара	Толық
Түсіндірмесі бар кері байланыс	Жоқ	Иә

Алынған деректер жасанды интеллект модельдерін жауаптарды талдау және бейімделген тестілеу жүйесіне енгізу «Деректер базасы» пәнін оқыту тиімділігін едәуір арттыратынын көрсетеді [13]. Қателерді жіктеу моделінің жоғары көрсеткіштері студенттердің проблемалық тұстарын дәл диагностикалауға мүмкіндік береді, ал ROC-AUC = 0.91 мәні бар ұсынымдық модулі қайта қарауды қажет ететін тақырыптарды сенімді түрде анықтайды. Сонымен қатар, ұсынылған жүйе жекелендіру деңгейі, диагностиканың тереңдігі және адаптивтілігі бойынша дәстүрлі шешімдерден айтарлықтай басым түседі.

Университет ортасында нақты пайдалану кезінде диагностика мен жекелендіру сапасының өсуін көрсететін үш интеграцияланған құрамдас бөлігі бар SQL кешенді аі оқыту жүйесі ұсынылған. Қателердің түрлерін түсіндірмелі бөлу, тақырыптар бойынша жеке ұсыныстар, IRT бойынша күрделілікті реттеу сияқты компоненттер іс жүзінде маңызды. Әдістеме мен архитектуралық шешімдер ат циклінің сабақтас пәндеріне көшіріледі және масштабталады. Әрі қарайғы зерттеуде датасет пен курстарды кеңейту, белгілеудің жартылай/нашар бақыланатын әдістерін енгізу, эмоционалды-танымдық факторлардың әсерін зерттеу және прогресстің жетілдірілген аналитикасы жоспарлануда.

Ұсынылған жүйе «Деректер базасы» пәнін және соған іргелес IT-бағыттарды оқытуда маңызды педагогикалық мәнге ие. Біріншіден, қателерді автоматтандырылған түрде жіктеу білімді формалды тексеруден диагностикалық бағалауға көшуге мүмкіндік береді. Бұл тәсіл ішкі тақырыптар (JOIN, агрегаттау, ішкі сұраныстар және т.б.) бойынша типтік қиындықтарды анықтауға бағытталған. Нәтижесінде бақылаудың қалыптастырушы функциясы күшейіп, мазмұнды әрі түсіндірмелі кері байланыс қамтамасыз етіледі.

Екіншіден, ұсынымдық модульдің интеграциясы оқу траекториясын жекелендіруге ықпал етеді: студент нақты тақырыптарды қайталауға бағытталған мақсатты ұсыныстар алады. Бұл оқытудың саналылығын арттырып, дайындықтың үзік-үзік болуын азайтады.

Үшіншіден, IRT-адаптивті тестілеуді қолдану білім алушының ағымдағы деңгейіне байланысты тапсырмалардың күрделілігін реттеуге мүмкіндік береді. Соның нәтижесінде білім алушының мүмкіндігіне сай тиімді оқу аймағы сақталып, тапсырмалардың шамадан тыс қиын немесе тым жеңіл болуынан туындайтын демотивацияны азайтады.

Зерттеудің әдістемелік үлесі – жасанды интеллект құралдарын қолданбалы сипаттағы пәнге интеграциялаудың қайта қолдануға болатын моделін әзірлеуінде. Мұнда тек теориялық білімді

тексеру ғана емес, сонымен қатар практикалық шешім құрастыру дағдыларын диагностикалау маңызды. Ұсынылған тәсіл АТ-циклдің басқа пәндеріне масштабтауға, сондай-ақ қорытынды аттестаттау мен қабылдау емтихандарына дайындық барысында қолдануға мүмкіндік береді.

Қорытынды. Деректер базасын меңгеру сапасы түлектердің қолданбалы міндеттерді шешу қабілетіне тікелей әсер етеді, ал университеттер үшін еңбек нарығының жылдам өзгеріп жатқан жағдайында білім беру бағдарламаларының өзектілігін сақтаудың негізгі факторы болып табылады. Сондықтан заманауи интеллектуалды технологияларды университеттік пәндерге енгізу жай ғана үрдіске ілесу емес, оқытудың сапасы мен тұрақтылығын арттырудың пәрменді құралы болып табылады мысалы: жасанды интеллект модельдері арқылы тақырыптар мен тақырыпшалар бойынша нақты диагностика жасауға, траекторияны персонализациялауға (тапсырмалардың күрделілігімен форматын бейімдеу), түсіндірмелі кері байланыс ұсыну және оқытушыға курсқа жедел түзетулер енгізу үшін аналитикалық панельдер беру. Нәтижесінде оқу бағдарламалары тартымды әрі бәсекеге қабілетті бола түседі, ал студенттер қысқа мерзімді курстарға тән «жылдам» дағдылардан бөлек, ұзақ мерзімді кәсіби табысқа негіз болатын берік және өзекті білім алады.

Бұл мақалада SQL оқытуға арналған ЖИ-негізіндегі жүйе сипатталып, оның тиімділігі эксперименттік түрде бағаланды. Жүйе RUBERT-қате классификациясын, XGBoost-ұсынымдық модулін және IRT-адаптивті тестілеуін біріктіреді.120 студент деректеріне сүйене отырып, жүйе келесі нәтижелер көрсетті:

- қате түрлері бойынша жоғары диагностикалық дәлдік (F1 0,90-ға дейін);

- тақырыптарды қайталау үшін сенімді ұсынымдар (ROC-AUC 0,91, accuracy 0,84);

- пайдаланушылар тәжірибесінің айтарлықтай жоғары деңгейі (SUS 82.5 қарсы 67.2).

Бұл нәтижелер «диагностика-ұсыным-адаптивтілік» байланысының SQL-ді жекелендірілген оқытудағы практикалық, тиімділігін дәлелдейді.

Зерттеудің шектеулеріне бір оқу бағдарламасының студенттерін ғана қамту, қателерді қолмен белгілеудің еңбек сыйымдылығы, сондай-ақ тек SQL-ге шоғырлану жатады. Болашақта жоспарланған қадамдар: зерттеуді кеңейту, белгілерді арзандату үшін жартылай немесе әлсіз бақыланатын әдістерді енгізу, сондай-ақ эмоция-танымдық факторлардың тест нәтижелеріне әсерін зерттеу. Бұл жұмыс негізінен SQL оқытуға арналған жасанды интеллект жүйесінің архитектурасы мен инженерлік-пайдалану аспектілеріне шоғырланады: қабаттар мен интерфейстер, сенімділік пен масштабталуды қамтамасыз ету.

Әдебиеттер

1. Gaitantzi A., Kazanidis I. The role of artificial intelligence in computer science education: A systematic review with a focus on database instruction// Applied Sciences.-2025.-Vol.15(7):3960 DOI 10.3390/app15073960.

2. Ocen S., Elasu J., Aarakit S.M., Olupot C. Artificial intelligence in higher education institutions: review of innovations, opportunities and challenges // Frontiers in Education.-2025. -Vol.10.-P.1-34. DOI 10.3389/feduc.2025.1530247.

3. Fabijanić M., Mekterović I. Partial SQL query assessment. Conference: 46th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO), 2023. DOI 10.23919/MIPRO57284.2023.10159706.

4. Schwartz D.R., Rivas P. An Automated SQL Query Grading System Using An Attention-Based Convolutional Neural Network. arXiv preprint, 2024. DOI 10.48550/arXiv.2406.15936.

5. Maher Joe Khan Omar Jian. Personalized learning through AI // Advances in Engineering Innovation. -2023. Vol.5(1). -P.16-19. DOI 10.54254/2977-3903/5/2023039.

6. Jose B., Cherian J., Verghis A., Varghise S., Mumthas S., Sibichan J. The cognitive paradox of AI in education: between enhancement and erosion//Front Psychol.-2025.-Vol.16:1550621. DOI 10.3389/fpsyg.2025.1550621.

7. Zaman B.U. Transforming Education Through AI Benefits Risks and Ethical Considerations //TechRxiv.-2023.-P.1-16. DOI 10.36227/techrxiv.24231583.v1.

8. Бермус А., Сериков В., Алтыникова Н. Содержание педагогического образования в современном мире: смыслы, проблемы, практики и перспективы развития // Вестник РУДН. Серия: Психология и педагогика. -2021.-Vol.18(4).-С.667-691. DOI 10.22363/2313-1683-2021-18-4-667-691.

9. Мантуленко В. Влияние искусственного интеллекта на успеваемость, познавательную активность и качество обучения студентов // Научно-методический электронный журнал «Концепт».-2025.- № 06.- С.251-272. DOI 10.24412/2304-120X-2025-11117.

10. Choi Y., McClenen C. Development of Adaptive Formative Assessment System Using Computerized Adaptive Testing and Dynamic Bayesian Networks // Applied Sciences. - 2020. - Vol.10(22): 8196. DOI 10.3390/app10228196.

11. Dabingaya M. Analyzing the Effectiveness of AI-Powered Adaptive Learning Platforms in Mathematics Education // Interdisciplinary Journal Papier Human Review.-2022.-Vol.3(1).- P.1-7. DOI 10.47667/ijphr.v3i1.226.

12. Тагирова Л.Ф., Зубкова Т.М. Интеллектуальная система адаптивного тестирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. -2023.- Т.23(4). - С.757-766. DOI 10.17586/2226-1494-2023-23-4-757-766.

13. Zhou J., Zhang J., Li H. Exploring the Use of Artificial Intelligence in Teaching Management and Evaluation Based on Citation Space Analysis // Journal of Education and Educational Research.-2023.-Vol.3(2).- P.42-45. DOI 10.54097/jeer.v3i2.9014.

References

1. Gaitantzi A., Kazanidis I. The role of artificial intelligence in computer science education: A systematic review with a focus on database instruction// Applied Sciences.-2025.-Vol.15(7). -P.1-34. DOI 10.3390/app15073960.

2. Ocen S., Elasu J., Aarakit S.M., Olupot C. Artificial intelligence in higher education institutions: review of innovations, opportunities and challenges // Frontiers in Education.-2025. -Vol.10.-P.1-34. DOI 10.3389/feduc.2025.1530247.

3. Fabijanić M., Mekterović I. Partial SQL query assessment. Conference: 46th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO), 2023. DOI 10.23919/MIPRO57284.2023.10159706.

4. Schwartz D.R., Rivas P. An Automated SQL Query Grading System Using An Attention-Based Convolutional Neural Network. arXiv preprint, 2024. DOI 10.48550/arXiv.2406.15936.

5. Maher Joe Khan Omar Jian. Personalized learning through AI // Advances in Engineering Innovation. -2023. Vol.5(1). -P.16-19. DOI 10.54254/2977-3903/5/2023039.

6. Jose B., Cherian J., Verghis A., Varghise S., Mumthas S., Sibichan J. The cognitive paradox of AI in education: between enhancement and erosion//Front Psychol.-2025.-Vol.16:1550621. DOI 10.3389/fpsyg.2025.1550621.

7. Zaman B.U. Transforming Education Through AI Benefits Risks and Ethical Considerations //TechRxiv.-2023.-P.1-16. DOI 10.36227/techrxiv.24231583.v1.

8. Bermus A., Serikov V., Altynikova N. Soderzhanie pedagogicheskogo obrazovanija v sovremennom mire: smysly, problemy, praktiki i perspektivy razvitija // Vestnik RUDN. Serija: Psihologija i pedagogika. -2021.-Vol.18(4).-C.667-691. DOI 10.22363/2313-1683-2021-18-4-667-691.[in Russian]

9. Mantulenko V. Vlijanie iskusstvennogo intellekta na uspevaemost', poznavatel' nuju aktivnost' i kachestvo obuchenija studentov // Nauchno-metodicheskij jelektronnyj zhurnal «Koncept». 2025. - № 06.- S.251-272. DOI 10.24412/2304-120X-2025-11117. [in Russian]

10. Choi Y., McClenen C. Development of Adaptive Formative Assessment System Using Computerized Adaptive Testing and Dynamic Bayesian Networks // Applied Sciences. - 2020. - Vol.10(22): 8196. DOI 10.3390/app10228196.

11. Dabingaya M. Analyzing the Effectiveness of AI-Powered Adaptive Learning Platforms in Mathematics Education // Interdisciplinary Journal Papier Human Review.-2022.-Vol.3(1).- P.1-7. DOI 10.47667/ijphr.v3i1.226.

12. Tagirova L.F., Zubkova T.M. Intellektual' naja sistema adaptivnogo testirovanija // Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. -2023.- T.23(4). - C.757-766. DOI 10.17586/2226-1494-2023-23-4-757-766. [in Russian]

13. Zhou J., Zhang J., Li H. Exploring the Use of Artificial Intelligence in Teaching Management and Evaluation Based on Citation Space Analysis // Journal of Education and Educational Research.-2023.-Vol.3(2).- P.42-45. DOI 10.54097/jeer.v3i2.9014.

Авторлар туралы мәлімет

Жарлықасов Б.Ж. - жаратылыстану ғылымдарының магистрі, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай, Қазақстан, e-mail: bakhtiyarzbj@gmail.com;

Баенова Г.М. - PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан e-mail:gulmmira@mail.ru;

Мауленов Қ.С. - PhD, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай, Қазақстан, e-mail: k.maulenov070693@gmail.com;

Сыздыкова А.М. - жаратылыстану ғылымдарының магистрі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail:aierke91@mail.ru.

Information about the authors

Zharlykassov B.Zh. - Master of Natural Sciences, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay, Kazakhstan, e-mail: bakhtiyarzbj@gmail.com;

Baenova G.M. - PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: gulmmira@mail.ru;

Maulenov K.S. - PhD, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay, Kazakhstan, e-mail: k.maulenov070693@gmail.com;

Syzdykova A.M. - Master of Natural Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: aierke91@mail.ru.

IRSTI 50.13.13 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1393**

SOFTWARE FOR SELECTIVE LASER MELTING METHOD FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

[1]A. Tulegulov, [1]A. Jumagaliyeva✉, [1]A. Sadu, [1]B. Yemilov, [1]M. Nurmagambetov, [1]J. Zhantlesov, [2]I. Dyussebayev

[1]K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,
[2]K. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan

✉ *Corresponding- author: jumagalievaainur.m@gmail.com*

The article is devoted to the study of additive manufacturing technologies, which have become increasingly important in recent years in modern mechanical engineering, aerospace engineering, medicine, and other high-tech industries. Of particular interest is the software for selective laser melting (SLM) technology. Modern algorithms allow for high dimensional accuracy, the ability to produce parts with specified properties, and a shorter production cycle compared to traditional manufacturing methods.

In this study, the focus is on the automated control system for printing parts and assemblies using selective laser melting. The obtained data can be further used in the development of algorithms for automated selection of powder compositions and SLM modes.

The purpose of this work is to automate the technology of selecting the composition of the powder material for selective laser melting. To achieve this goal, the work involves studying the SLM technology and the features of obtaining powders from technogenic waste, developing an algorithm for automating the selection of powder composition, and creating a software module that provides automatic selection of the optimal powder composition and printing parameters.

The scientific novelty and significance of the work lie in the creation of a software and hardware complex for the rapid selection of powder composition and parameters of the selective laser melting process. The implementation of the proposed approach makes it possible to produce practical parts in a short time without compromising the quality and performance of the material, and it also forms the basis for further development of automated additive manufacturing control systems.

Keywords: additive manufacturing, software, algorithm, software and hardware complex, selective laser melting (SLM), automation.

АДДИТИВТІ ТЕХНОЛОГИЯЛАРҒА АРНАЛҒАН СЕЛЕКТИВТІ ЛАЗЕРЛІК БАЛҚЫТУ ӘДІСІНІҢ БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ЖАСАҚТАМАСЫ

[1]А.Д. Тулегулов, [1]А.М. Джумагалиева✉, [1]А. Саду, [1]Б. Емилов, [1]М.Ш. Нурмагамбетов, [1]Ж. Жантлесов, [2]И.М. Дюсебаев

[1]К. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
[2]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан,
e-mail: jumagalievaainur.m@gmail.com

Мақала соңғы жылдары заманауи машина жасауда, аэроғарыштық техникада, медицинада және басқа да жоғары технологиялық салаларда маңызды рөл атқарған аддитивті өндіріс технологияларын зерттеуге арналған. Селективті лазерлік балқыту (SLM) технологиясының бағдарламалық жасақтамасы ерекше қызығушылық тудырады. Заманауи Алгоритмдер өлшемдердің жоғары дәлдігін, берілген қасиеттері бар бөлшектерді жасау мүмкіндігін және дәстүрлі өндіріс әдістерімен салыстырғанда өндіріс циклін қысқартуға мүмкіндік береді.

Осы зерттеу шеңберінде талдау объектісі ретінде селективті лазерлік балқыту әдісімен бөлшектер мен тораптарды басып шығару процесін басқарудың автоматтандырылған жүйесі қарастырылады. Алынған мәліметтер болашақта ұнтақтардың құрамын және SLM режимдерін автоматтандырылған таңдау алгоритмдерін жасау кезінде қолданыла алады.

Бұл жұмыстың мақсаты селективті лазерлік балқыту үшін ұнтақ материалының құрамын таңдау технологиясын автоматтандыру болып табылады. Жұмыста қойылған мақсатқа жету үшін SLM технологиясын және техногендік қалдықтардан ұнтақтарды алу ерекшеліктерін зерделеу, ұнтақ құрамын таңдауды автоматтандыру алгоритмін әзірлеу, сондай-ақ ұнтақтың оңтайлы құрамы мен басып шығару параметрлерін автоматты түрде таңдауды қамтамасыз ететін бағдарламалық модуль құру көзделеді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы мен маңыздылығы ұнтақтың құрамын және селективті лазерлік балқу процесінің параметрлерін жедел таңдау үшін бағдарламалық-техникалық кешен құру болып табылады. Ұсынылған тәсілді іске асыру материалдың сапасы мен пайдалану қасиеттерін жоғалтпай қысқа мерзімде практикалық бөлшектерді дайындау мүмкіндігін қамтамасыз етеді, сондай-ақ қосымша өндірісті басқарудың автоматтандырылған жүйелерін одан әрі дамыту үшін негіз қалыптастырады.

Түйін сөздер: аддитивті өндіріс, бағдарламалық қамтамасыз ету, алгоритм, бағдарламалық-техникалық кешен, селективті лазерлік балқыту (SLM), автоматтандыру.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

[1]А.Д. Тулегулов, [1]А.М. Джумагалиева✉, [1]А. Саду, [1]Б. Емилов, [1]М.Ш. Нурмагамбетов, [1]Ж. Жантлесов, [2]И.М. Дюсебаев

[1]Казахский университет технологии и бизнеса им. Кулажанова, Астана, Казахстан,
[2]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан,
e-mail: jumagalievaainur.m@gmail.com

Статья посвящена исследованию аддитивных технологий производства, которые в последние годы приобрели значительную важность в современном машиностроении, аэрокосмической технике, медицине и других высокотехнологичных отраслях промышленности. Особый интерес представляет программное обеспечение технологии селективного лазерного плавление (SLM). Современные алгоритмы позволяют обеспечить высокую точность размеров, возможность изготовления деталей с заданными свойствами и сокращение производственного цикла по сравнению с традиционными методами производства.

В рамках данного исследования в качестве объекта анализа рассматривается автоматизированная система управления процессом печати деталей и узлов методом селективного лазерного плавления. Полученные данные могут быть использованы в дальнейшем при разработке алгоритмов автоматизированного подбора состава порошков и режимов SLM.

Целью данной работы является автоматизация технологии подбора состава порошкового материала для селективного лазерного плавления. Для достижения поставленной цели в работе предполагается изучение технологии SLM и особенностей получения порошков из техногенных отходов, разработка алгоритма автоматизации подбора состава порошка, а также создание программного модуля, обеспечивающего автоматический выбор оптимального состава порошка и параметров печати.

Научная новизна и значимость работы заключается в создании программно-технического комплекса для оперативного подбора состава порошка и параметров процесса селективного лазерного плавления. Реализация предлагаемого подхода обеспечивает возможность изготовления практических деталей в сжатые сроки без потери качества и эксплуатационных свойств материала, а также формирует основу для дальнейшего развития автоматизированных систем управления аддитивным производством.

Ключевые слова: аддитивное производство, программное обеспечение, алгоритм, программно-технический комплекс, селективная лазерная плавка (SLM), автоматизация.

Introduction. Current trends in the development of additive manufacturing technologies are closely associated with the implementation of automation and intelligent control of technological processes. The automation of powder composition selection and selective laser melting parameters reduces process preparation time, minimizes the influence of the human factor, and ensures high reproducibility of manufacturing results.

In this study, a gear manufactured by selective laser melting is analyzed as an example of a functional component operating under mechanical loads. To evaluate the quality of the formed material, optical microscopy is employed to investigate the microstructure, the characteristics of layer-by-layer formation, and the presence of defects associated with the laser melting process. The obtained data can be further used to develop algorithms for the automated selection of powder compositions and SLM processing parameters.

The aim of this work is to automate the technology for selecting the composition of powder materials for selective laser melting. To achieve this aim, the study addresses the following objectives: investigation of SLM technology and the features of powder production from industrial waste; development of an algorithm for automating the selection of powder composition; and creation of a software module that enables the automatic determination of optimal powder compositions and SLM processing parameters.

The scientific novelty of this research lies in the fact that, in the Republic of Kazakhstan, studies focused on the development of composite powder materials for additive manufacturing technologies, particularly for selective laser melting, have been extremely limited. Within the framework of this work, powder materials derived from locally available industrial waste are obtained and analyzed for the first time, followed by an assessment of the quality of manufactured parts based on microstructural analysis [1].

The scientific significance of the study consists in the development of a domestically grounded methodology that enables the rapid selection of powder compositions and selective laser melting parameters under various technological conditions. The implementation of the proposed approach makes it possible to manufacture functional parts within a short timeframe without compromising material quality or performance characteristics, and also establishes a foundation for the further development of automated control systems in additive manufacturing.

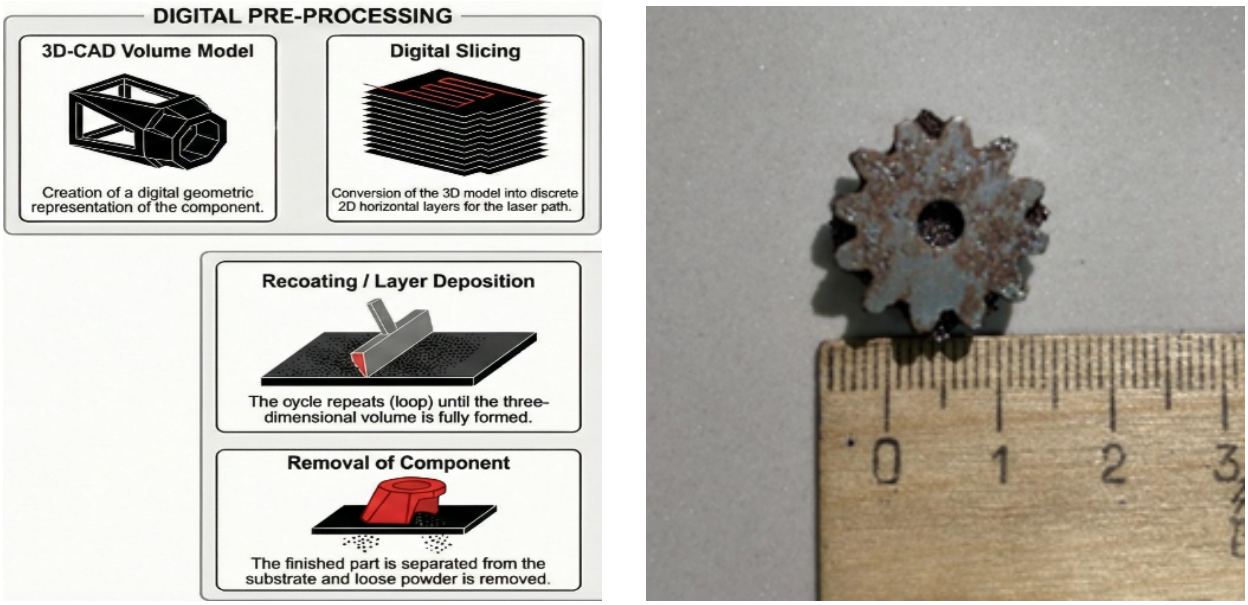
Materials and methods. The object of research in this work is a metal gear made by selective laser melting (Selective Laser Melting, SLM) from powder material. The choice of a gear as an object of research is due to the fact that this part belongs to the class of functional elements of machines and mechanisms operating under conditions of cyclic mechanical loads and increased requirements for geometric accuracy and surface quality [2].

Gears produced using the SLM process are of practical interest for mechanical engineering and precision instrument manufacturing, as additive technologies enable the fabrication of components with complex geometries without the use of conventional machining operations. At the same time, the quality of such products is largely determined by the characteristics of microstructure formation during the layer-by-layer laser melting of the powder material (fig.1a).

In this study, the gear is considered as a model component that allows the assessment of the influence of additive manufacturing process parameters on the structure of the formed material. Microstructural analysis of the product makes it possible to identify characteristic features of SLM technology, including the layered structure, structural heterogeneity, and the presence of potential defects associated with laser processing conditions and the properties of the initial powder material (fig.1b).

For the microscopic examination of the gear structure, a MAGUS Metal 630 metallographic microscope equipped with a trinocular head was used. The microscope is designed for the investigation of opaque metallic samples in reflected light mode [3]. The optical system provides an effective magnification range of approximately 50× to 500×, enabling the

acquisition of both overview images of the surface and detailed images of local microstructural features. (fig.2)



a **b**

Fig.1 - Infographics of SLM technology(a). The resulting sample(b)

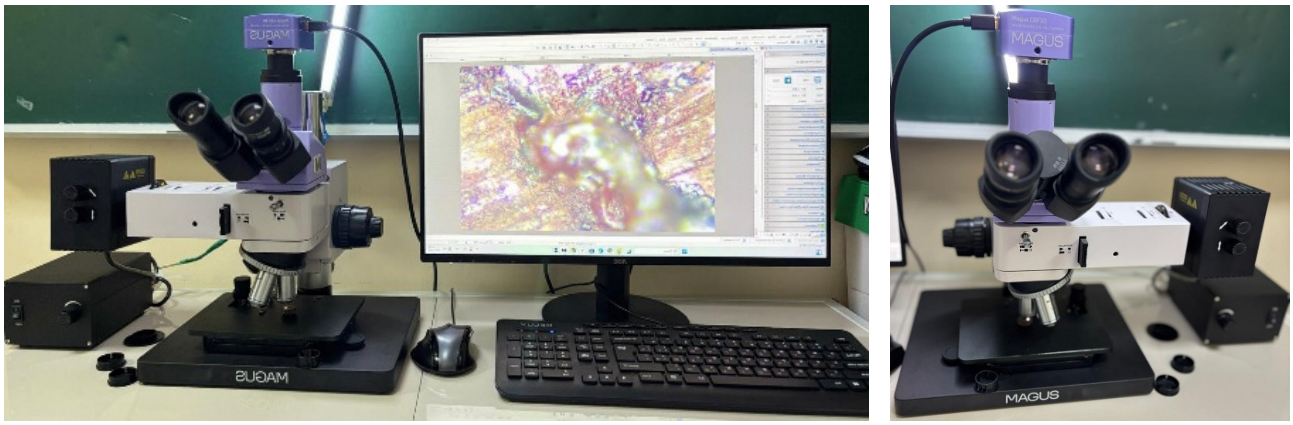


Fig.2 - Magus 630 Microscope

Microscopic observations were carried out in reflected light at various magnifications, which made it possible to obtain a general view of the gear surface as well as high-resolution images of selected areas characterizing the microstructural features of the material [4].

The microscope specifications are presented in Table 1.

The surface of the sample under investigation was subjected to visual analysis without complex metallographic preparation, which is consistent with the objectives of the work and the conditions of practical quality control of additive manufacturing products. This approach allows us to evaluate the possibility of using optical microscopy as an element of operational and potentially automated control of products obtained by the SLM method. (tab.2)

Table 1 - MAGUS Metal 630 microscope specifications

Parameter	Value
Microscope type	Metallographic optical
Purpose	Reflected light microscopy for metals and alloys
Image capture method	Digital camera (MAGUS CBF30)
Magnification (total)	50–500× (basic configuration)
Eyepieces	10×/22 mm (10 mm interpupillary distance) (other eyepiece options available)
Objectives (included)	PL L5×/0,12; PL L10×/0,25; PL L20×/0,40; PL L50×/0,70

Table 2 -Main materials and methods of additive manufacturing of metals

Category	Material / Method	Ultimate tensile strength, MPa	Yield strength, MPa	Application area	Key advantages
Aluminum alloys	AlSi10Mg	460 ± 20	270 ± 10	Aerospace, automotive, defense industries	High strength, corrosion resistance, relatively low cost
	AlSi12	409 ± 20	211 ± 20	Lattice and lightweight structures	High bending strength, good castability
	AlSi9Cu3	415 ± 15	236 ± 8	Aerospace and automotive components	Improved mechanical properties compared to casting
	AlCuMgZr	451 ± 4	446 ± 4	High-load aerospace components	Near-full density, high fatigue strength
Magnesium alloys	WE43 (Mg–Nd–Zn–Zr)	-	-	Biomedical implants	Biocompatibility, biodegradability, porous structure supporting bone ingrowth
Titanium alloys	Ti-6Al-4V / Ti-45Nb	-	-	Implants, aerospace industry	High specific strength, reduced Young's modulus (Ti-45Nb)

During the study, microphotographs of the gear surface were taken, reflecting the nature of the layer-by-layer formation of the material, the presence of porosity, inhomogeneities, and other structural features [5-6]. The images obtained were used for subsequent analysis and interpretation of the microstructure of the product, as well as for comparing the observed features with data presented in scientific publications on selective laser melting (fig.3).

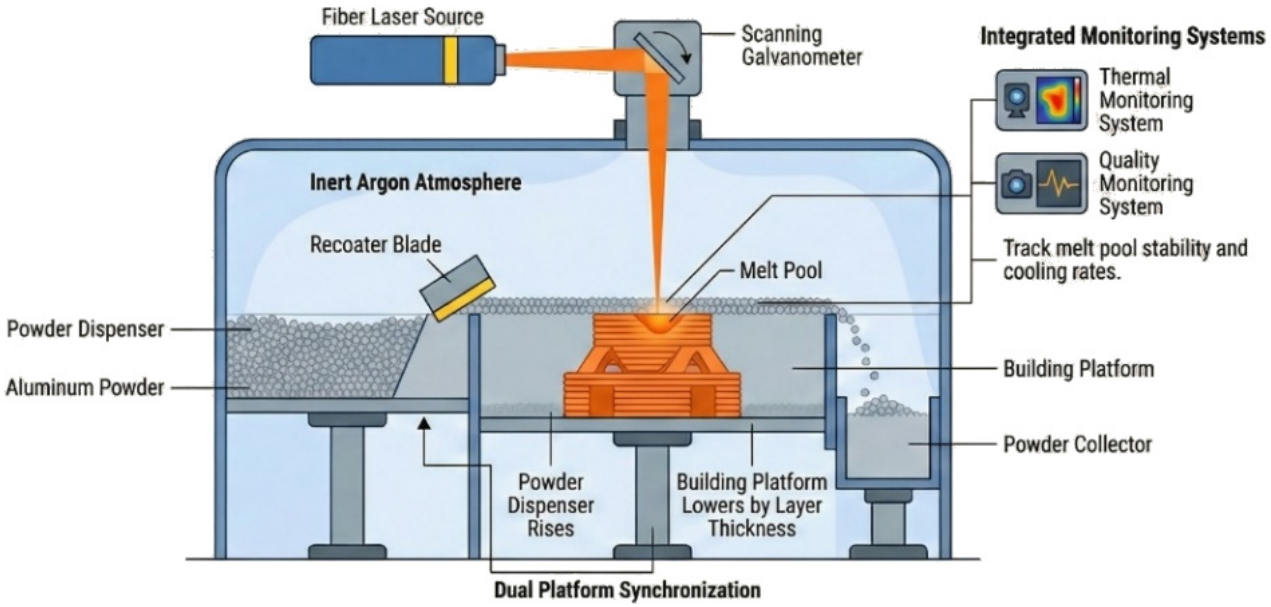


Fig.3 - LPBF Operational Principles and Schematic

Figure 4 illustrates the schematic representation of the selective laser melting (SLM) process used for the fabrication of metal components from powder materials. The process is based on the layer-by-layer melting of a thin powder layer by a high-energy laser beam, followed by solidification and bonding with the previously formed layer.

During the manufacturing process, a powder dispenser supplies a controlled amount of metal powder onto the build platform. A recoater blade spreads the powder into a uniform layer with a predefined thickness. The build chamber is filled with an inert argon atmosphere to prevent oxidation of the molten material and to ensure stable melting conditions [7-9].

A fiber laser source generates a focused laser beam, which is directed onto the powder bed by a scanning galvanometer system. The laser selectively melts the powder according to the predefined scan strategy, forming a localized molten pool. After laser exposure, the molten material rapidly solidifies, resulting in the formation of a dense solid layer.

Results and Discussions. As a result of microscopic analysis of the surface of a gear manufactured using selective laser melting, micrographs were obtained that reflect the peculiarities of material structure formation during the additive manufacturing process. The investigation was conducted at various magnifications, which made it possible to evaluate both the overall surface morphology of the product and local structural features (fig.4).

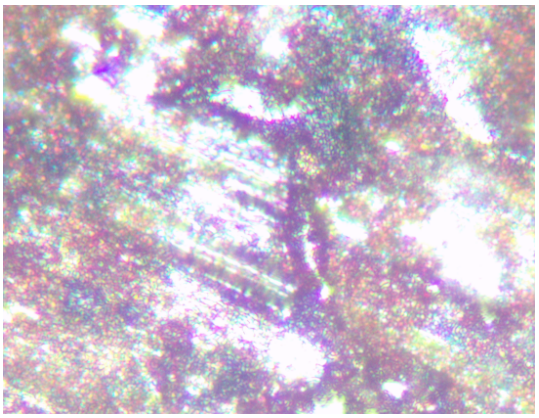


Fig.4 - Photograph of a gear with 40x magnification

At a magnification of 40× (fig.5), a heterogeneous surface structure formed as a result of the layer-by-layer laser melting of the powder material can be clearly observed [10]. The surface morphology is characterized by alternating regions with different degrees of fusion, which is a typical feature of components produced using the SLM process.

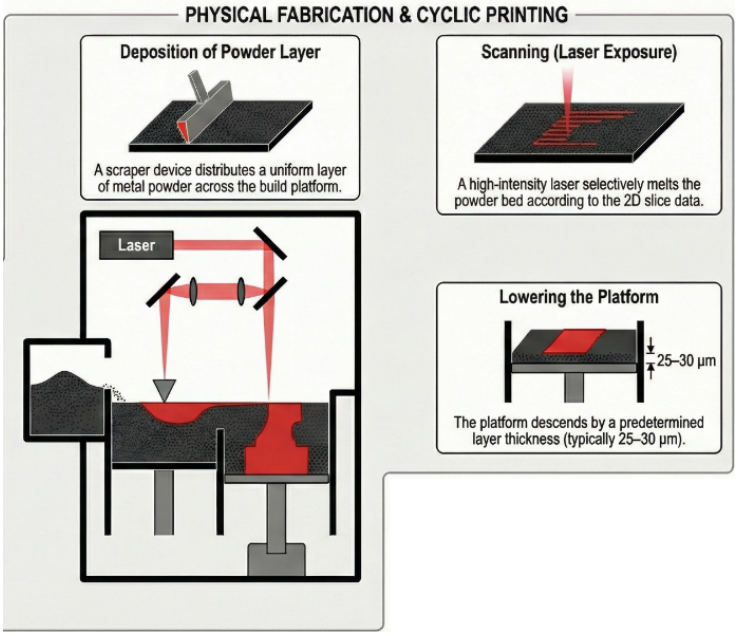
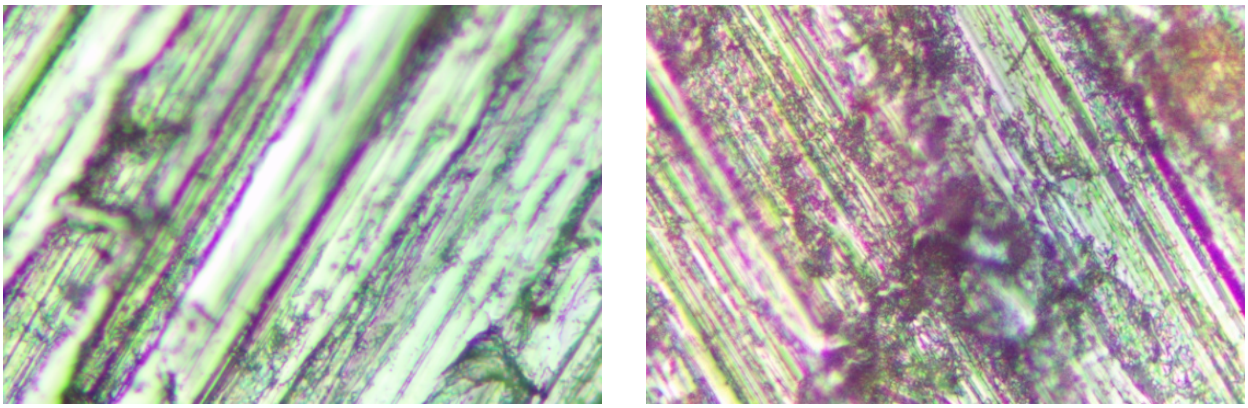


Fig.5 - Powder Bed Fusion Physical Manufacturing Cycle

The arrangement of structural features indicates a pronounced directionality of the material formation process, determined by the laser scanning strategy and the sequence of layer deposition. Similar structural characteristics are widely reported in scientific studies devoted to the selective laser melting of metallic powders and confirm the validity of the selected technological approach. (fig.6a). At a magnification of 50× (fig.6b), a more detailed analysis of the surface structure becomes possible. The micrographs reveal characteristic boundaries between individual layers formed during the successive melting of the powder material. The presence of pronounced layering is a consequence of the discrete nature of the additive manufacturing process and is determined by the applied layer thickness and laser processing parameters.



a **b**

Fig.6 - Photo of the gear from the reverse side 50×

In certain areas of the surface, areas with increased roughness and local structural in homogeneities were identified. These features may be associated with the uneven distribution of heat

flows in the laser exposure zone, as well as with variations in the properties of the powder material, including particle size and shape [11].

It should be noted that no pronounced macrodefects, such as large cracks or regions of incomplete fusion, were detected in the investigated sample. This indicates sufficient stability of the selective laser melting process and appropriately selected baseline printing parameters for the fabrication of a functional component.

Individual micrographs (fig.7) show the presence of small pores distributed unevenly across the surface of the product. Porosity is one of the most common defects in additive manufacturing using the SLM method and can result from insufficient laser energy density, the presence of gas inclusions in the powder, or incomplete fusion of particles.

The size and morphology of the observed pores indicate microporosity, which generally has a less pronounced effect on the operational properties of the component compared to larger defects. Nevertheless, the presence of even fine porosity should be taken into account in the further selection of powder material composition and optimization of selective laser melting process parameters.

The obtained results confirm the feasibility of using microscopic analysis as a tool for the primary quality assessment of components manufactured by selective laser melting, particularly at the stages of powder composition development and process parameter optimization.

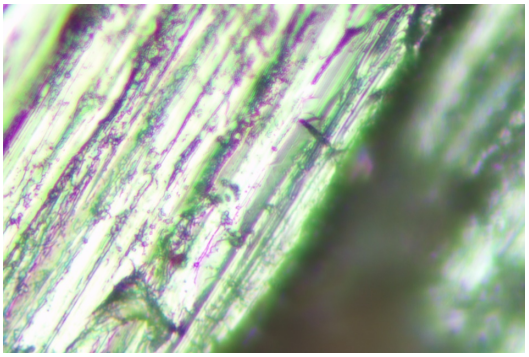


Fig.7 - Morphology of gear wear particles revealed by optical microscopy

The obtained data confirm the feasibility of using microscopic analysis as a tool for the preliminary quality assessment of components manufactured by selective laser melting, particularly at the stages of powder composition development and optimization of technological process parameters.

Figure 8 presents optical micrographs of the surface of the gear manufactured by selective laser melting at different magnifications. At a magnification of 40×, a heterogeneous surface structure associated with the layer-by-layer nature of material formation is clearly observed. At a magnification of 500×, local structural inhomogeneities and individual pores characteristic of SLM-fabricated components are revealed.

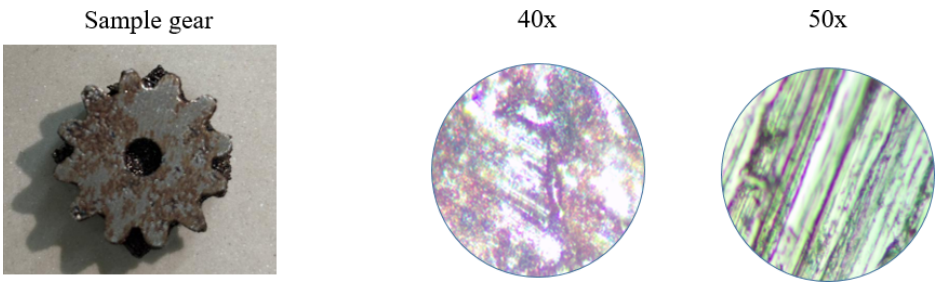


Fig.8 - Photograph of sample images of a gear

Conclusion. During the study, the microstructural features of a gear manufactured by selective laser melting were evaluated using optical microscopy. The obtained micrographs revealed characteristic features of the additive manufacturing process, including layer-by-layer material formation, microstructural heterogeneity, and the presence of microporosity.

The microstructural analysis showed that the

investigated sample exhibits structural features typical of SLM-produced components, while no significant macrodefects, such as cracks or regions of incomplete fusion, were detected. This indicates sufficient stability of the selective laser melting process and an acceptable level of material quality for functional applications.

The results of the study confirm that optical microscopy is an effective and accessible method for the preliminary quality assessment of parts manufactured using selective laser melting. This method enables the rapid identification of key microstructural features and potential defects, which is particularly important during the stages of powder material selection and optimization of SLM processing parameters.

The obtained results can be used as a basis for the further development of automated algorithms for selecting powder compositions and selective laser melting parameters, as well as for the creation of quality control systems in additive manufacturing aimed at improving the reproducibility and reliability of manufactured components.

Funding. *This study is funded by the Committee on science and higher education (No. AR23490424 Development of an additive installation for the manufacture of metal objects for the defense industry").*

References

1. Liu J., et al. Automated, economical, and environmentally-friendly asphalt mix design based on machine learning and multi-objective grey wolf optimization// Journal of traffic and transportation engineering. -2024. -Vol. 11(3). - P.381- 405. DOI 10.1016/j.jtte.2023.10.002.

2. Sharov K, et al. The dry mortar consumption calculation automation in the finishing work organization// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. -2020. -Vol. 913:032042. DOI 10.1088/1757-899X/913/3/032042.

3. Barbhuiya S., Saeed Sh. Artificial Intelligence in Concrete Mix Design: Advances, Applications and Challenges// International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies. -2023. -P.32-37. DOI 10.1109/3ICT60104.2023.10391485.

4. Smakova N., Tulegulov A., et al. Software development for SLM-3D printer prototype control system using klipper firmware program// KazUTB Bulletin. -2025. -T.3(28). -P.166-176. DOI 10.58805/kazutb.v.3.28-1138.

5. Shegetaeva A., Smakova N., Tulegulov A., Steremhartz A. Algorithm for multi-factored forecasting of network vulnerabilities: from CVE data analysis to the development of a forecasting model// KazUTB Bulletin. -2025. -T.2(27). -P.112-123. DOI 10.58805/kazutb.v.2.27-1006.

6. Tulegulov A., Akishev K., et al. Evaluation of the use of automated control systems for solving traffic control problems// KazUTB Bulletin. -2024. -T.4(25). -P.8-15. DOI 10.58805/kazutb.v.4.25-668.

7. Tulegulov A., Zhamangarin D., et al. The use of digital technologies for intelligent traffic management//KazUTB Bulletin. -2024. -T.2(23)-2024. -P.146-155. DOI 10.58805/kazutb.v.2.23-485.

8. Aryngazin K., Akishev K., Tulegulov A., et al. Development of an information and logical database model for accounting and movement of wind turbine equipment// KazUTB Bulletin. -2024. -T.1(22). -P.22-29. DOI 10.58805/kazutb.v.1.22-248.

9. Jumagaliyeva A., et al. The impact of blockchain and artificial intelligence technologies in network security for e-voting// International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). -2024. -Vol.14 (6). -P.6723~6733. DOI 10.11591/ijece. v14i6.pp.6723-6733.

10. Yergesh M., Tulegulov A., et al. Development of an intelligent system automating managerial decision-making using big data// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. -2023. -T.6. -№ 3(126). -P.27-35 DOI 10.15587/1729-4061.2023.289395.

11. Bayzharikova M., Tulegulov A., et al. Evalution of the efficiency of the technological process for the production of building products with fillers from metallurgical slag// Metalurgija. -2024. -Vol.63(2). -P.267-270. ISSN 0543-5846.

Information about the authors

Tulegulov A.D. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: tad62@ya.ru;

Jumagalieva A.M. - Master' s degree, Associate Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: jumagalievaainur.m@gmail.com;

Sadu A. - Master' s student, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: alishersadu9@gmail.com;

Yemilov Birzhan – Master' s student, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: chuckbot30@gmail.com;

Nurmagambetov M.Sh. - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: Nurmag@mail.ru;

Zhangabyl Kh.Zh. - Candidate of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: Zhan@mail.ru;

Dyussebayev I. - PhD, K.I. Satpayev Kazakh National Research University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: Nomad.i.m.13@mail.ru.

Сведения об авторах

Тулегулов А. Д.-кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: tad62@ya.ru;

Жумагалиева А. М.-магистр, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: jumagalievaainur.m@gmail.com;

Саду А.-магистрант, Казахский университет технологии и бизнеса им.К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: alishersadu9@gmail.com;

Емилов Б.-магистрант, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: chuckbot30@gmail.com;

Нурмагамбетов М. Ш.-кандидат с.-х. наук, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: Nurmag@mail.ru;

Жантлесов Ж.Х.-кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: Zhan@mail.ru;

Дюсебаев И.-доктор PhD, Казахский национальный исследовательский университет им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: Nomad13@mail.ru.

IRSTI: 27.35.21 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1409**

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF THE MAIN UNITS OF THE SULFUR PRODUCTION UNIT BASED ON SYSTEM ANALYSIS

B.B. Orazbayev, N.N. Seit

L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Corresponding author: nurgulnurmash@gmail.com

A methodology has been proposed for constructing a package of models for technological systems composed of interconnected units, based on diverse available information. This methodology is demonstrated through the development of models for the main units of the sulfur production block. The models describing the relationship between sulfur yield at the reactor outlets and their input and operating parameters were identified as a system of multiple regression equations, using aggregated experimental, statistical, and expert data, along with the sequential inclusion of regressors approach. Models assessing the sulfur quality at the Claus reactor outlet were constructed as fuzzy regression equations. Parametric identification of the regression coefficients was performed using the least squares method in the REGRESS software package, while fuzzy regression coefficients were determined using modified least squares and α-level sets within the framework of fuzzy set theory. As a result, mathematical models of the thermoreactor and Claus reactor at the Atyrau refinery's sulfur production unit were developed.

Keywords: sulfur production unit, mathematical model, system analysis, fuzzy information, fuzzy model, structural and parametric identification.

КҮКІРТ ӨНДІРУ БЛОГЫ НЕГІЗГІ АГРЕГАТТАРЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕР КЕШЕНІН ЖҮЙЕЛІК ТАЛДАУ НЕГІЗІНДН ҚҰРУ

Б.Б. Оразбаев, Н.Н. Сейт

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
e-mail: nurgulnurmash@gmail.com

Өзара байланысқан агрегаттар кешенінен тұратын технологиялық жүйенің модельдер пакетін әртүрлі қолжетімді ақпараттар негізінде және жүйелік талдау тәсілдерін қолдану арқылы құру методикасы әзірленіп, оны күкірт өндіру блогы мысалында жүзеге асыру көрсетілген. Жинақталған және өңделген эксперименталдық-статистикалық деректер мен эксперттік ақпараттар негізінде, сондай-ақ регрессорларды тізбектей қосу тәсілінің идеясын пайдалана отырып, реакторлар шығысындағы күкірт көлемін сипаттайтын модельдер құрылымы көп регрессиялық теңдеулер жүйесі түрінде идентификацияланған. Клаус реакторының шығысындағы күкірт сапасын бағалайтын модельдер айқын емес регрессиялық теңдеулер түрінде жасалған. Регрессиялық коэффициенттерді параметрлік идентификациялау ең кіші квадраттар әдісі арқылы REGRESS бағдарламалық пакетінде жүзеге асырылған, ал айқын емес коэффициенттерді анықтау α-деңгейлі жиындар негізінде айқын емес жиындар теориясының тәсілдері арқылы орындалған. Нәтижесінде, Атырау МӨЗ күкірт өндіру блогының термо және Клаус реакторларының математикалық модельдері құрылған.

Түйін сөздер: күкірт өндіру блогы, математикалық модель, жүйелік талдау, айқын емес ақпарат, айқын емес модель, құрылымдық, параметрлік идентификациялау.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОСНОВНЫХ АГРЕГАТОВ БЛОКА ПРОИЗВОДСТВА СЕРЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Б.Б. Оразбаев, Н.Н. Сейт

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
e-mail: nurgulnurmash@gmail.com

Разработана методика построения пакета моделей технологической системы, состоящей из взаимосвязанных агрегатов, на основе различных доступных данных с использованием методов системного анализа, и реализована на примере блока производства серы. На основе агрегированных и обработанных экспериментально-статистических данных и экспертной информации, а также с использованием идеи последовательного включения регрессоров, были идентифицированы модели, описывающие объем серы на выходе реакторов, в виде системы многорегрессионных уравнений. Модели, оценивающие качество серы на выходе Клаус-реактора, построены в форме нечетких регрессионных уравнений. Параметрическая идентификация регрессионных коэффициентов выполнялась с применением метода наименьших квадратов через программный пакет REGRESS, а нечеткие коэффициенты определялись с использованием методов теории нечетких множеств и преобразования на основе α-уровней. В результате были построены математические модели термо- и Клаус-реакторов блока производства серы Атырауского НПЗ.

Ключевые слова: блок производства серы, математическая модель, системный анализ, нечеткая информация, нечеткая модель, структурная и параметрическая идентификация.

Introduction. In oil refining production, for example at the Atyrau Oil Refinery, the existing sulfur production unit is a complex facility, that is, a system consisting of interconnected units influenced simultaneously by many different parameters [1]. The main units of the sulfur production block include reactors, namely the Claus reactor (R-001), thermal (SWS) reactors (R-002, R-003); condensers (E-001, E-002, E-004); a furnace (F-002); separators (D-001, D-004); and pumps (B-001, B-002) [2]. An analysis of approaches to developing mathematical models of such complex technological facilities has shown that issues related to constructing mathematical models of complexes consisting of interconnected technological units under conditions of insufficient initial information, as well as system modeling of their operation, remain insufficiently studied [3-8].

When developing mathematical models of industrial technological facilities and systems, problems arise due to the lack of initial information required for their construction.

Under conditions of uncertainty arising from the randomness of the initial information, it is recommended to apply probabilistic modeling or simulation modeling approaches [9-12].

However, if uncertainty arises due to the vagueness of the initial information-which is common in industrial practice-these approaches cannot be applied. In such cases, statistical data are insufficient or completely unavailable, and because the information is vague, it is impossible to collect quantitative statistical data. As a result, the axioms of probability theory (such as statistical stability of the object, repetition of experiments under identical conditions, etc.) are not satisfied, and therefore there is no basis for applying probabilistic approaches. Conducting active experiments for the purpose of collecting statistical data is either impossible or economically inefficient [13, 14]. Thus, in these situations, the main available information consists of vague information expressed in the form of words, statements, opinions, and judgments based on the knowledge, experience, and intuition of human decision-makers and expert specialists. In such cases, it is undoubtedly possible to compensate for the missing part of the information required for model development by using vague (fuzzy) information. That is, it is necessary to organize and conduct expert evaluation [15-17] and to process its results using methods of fuzzy set theory [18]. If the indicated sources of fuzzy information are reliable-namely, if the decision-makers and expert specialists are competent and the expert evaluation and its results are processed correctly-then on the basis of such information it is possible to construct models that take into account all complex interrelations between various parameters of complex, non-quantifiable industrial facilities and processes and that most closely correspond to real production conditions. The obtained fuzzy models, as a rule, describe real industrial facilities

and problems with higher adequacy than models constructed using traditional approaches (if such models can be constructed at all). Therefore, the development of mathematical models of technological systems in industry based on various available types of information, including fuzzy information, using the methodology of systems analysis, is a highly relevant task for both science and industry.

The aim of this work is to develop a methodology for constructing a complex of mathematical models for technologically complex units with difficult quantitative characterization, using the main units of the sulfur production block as an example, based on systems analysis, as well as to develop models of the main reactors of the sulfur production block.

Materials and Methods. It is necessary to formulate a methodology for constructing a system of mathematical models of industrial technological facilities that operate under conditions of insufficient initial information and uncertainty and are difficult to describe using quantitative data. Using the Claus reactor and thermal reactors as examples-where part of the available initial information is characterized by uncertainty-it is required to construct mathematical models of reactors R-001, R-002, and R-003 for the purpose of their optimal control, employing statistical data and fuzzy information [19]. Let us formulate the problem of developing mathematical models of the Claus and thermal reactors using statistical methods, expert evaluation, and approaches based on fuzzy set theory. As a result of collecting and processing the available initial information, it has been established that the statistical data required to estimate the sulfur yield (output) at the outlets of these reactors can be obtained experimentally. That is, statistical models determining the sulfur output at the reactor outlets can be constructed in the form of regression equations. Since quantitative information for assessing the quality of the produced sulfur is insufficient and cannot be collected, models for evaluating sulfur quality should be developed based on additional fuzzy information.

Thus, through an interconnected internal (parametric) and external (structural) cyclic process, the problem is formulated of identifying mathematical models of the sulfur production reactors under study in the form of the following set of regression and fuzzy regression equations:

$$y_j = a_{0j} + \sum_{i=1}^{n} a_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=i}^{n} a_{ijk}x_{ij}x_{kj} + ...+, j = 1,2$$

$$\widetilde{y_j} = \tilde{a}_{0j} + \sum_{i=n+1}^{m} \tilde{a}_{ij}x_{ij} + \sum_{i=n+1}^{m}\sum_{k=i}^{m} \tilde{a}_{ijk}x_{ij}x_{kj} + ...+, j = 3,4.$$

The constructed models should adequately describe the sulfur yield at the outlets of the thermal reactors and the Claus reactor ($y_j,\ j = 1,2$) , as well as the fuzzy indicators characterizing sulfur quality, namely the mass fraction of sulfur and the mass fraction ($\tilde{y}_j,\ j = 3,4$) of water in the product obtained from the Claus reactor.

Solution approaches and results. The results of this work include a methodology for constructing mathematical models of technological facilities based on various types of information using systems analysis, as well as models of the Claus and thermal reactors. The units of the sulfur production block are interconnected, and changes in the operating parameters of one unit lead to changes in the parameters of others, thereby affecting the sulfur production process. Therefore, to optimize and control the sulfur production process, a system of models of the main units of the technological complex is required, constructed on the basis of systems analysis and taking into account the influence of technological parameters of each unit on the intermediate and final products of the entire complex. In order to develop such a system (package) of models, this work employs systems

analysis methods, probabilistic and experimental-statistical approaches, as well as expert evaluation and fuzzy set theory methods [20].

Let us formulate a methodology for constructing a complex of mathematical models of complex industrial technological facilities based on systems analysis. The model of each facility within a technological system can be developed using various approaches and methods; that is, for each unit of the sulfur production complex, a set of models may be obtained, for example deterministic, statistical, fuzzy, or structured models.

In order to integrate such diverse models into a single complex (model package) for the purpose of system-level modeling of the technological complex, a systems analysis of the advantages and disadvantages of each model to be constructed is required. This involves defining criteria that evaluate characteristics such as the costs required to develop the model, its accuracy, adequacy, applicability for the intended purpose, and so on, as well as establishing principles for combining the constructed models into a single package.

For this purpose, the various possible types of models for the main units of the sulfur production block have been systematically analyzed. Based on the study of the features of the sulfur production complex and process [21], experimental and expert evaluation data, and an analysis of modeling approaches for these or similar complex units, the possible model types for the main units of the sulfur production block have been assessed. The results of this analysis (model evaluation) are presented in Table 1. The main criteria used to compare the different types of models for evaluation are: the availability of information required to construct the model; the cost (complexity) of model development; the accuracy (adequacy) of the model; the applicability of the model for the intended purpose (in our case, solving multi-criteria optimization and control problems under conditions of uncertainty); and the possibility of integrating the model into a single system (package) for the purpose of system-level modeling of the entire facility.

Table 1 presents the evaluations of the possible models for the main units of the sulfur production block, obtained based on the processing of the results of the systematic analysis. Based on the information provided in the table, it is possible to select the most effective types of models for the main units of sulfur production according to the chosen criteria.

The construction of regression models for the reactors of the sulfur production block at the Atyrau Oil Refinery is complicated due to the lack or insufficiency of proper statistical information, the absence of specialized industrial instruments, and the low reliability of the available instruments. Therefore, as an effective tool to supplement the missing information with additional qualitative data-such as the knowledge, experience, and judgment of expert specialists-it is recommended to use expert evaluation methods, while the modeling approach should involve models and composite methods based on fuzzy set theory.

The accuracy of the constructed fuzzy or composite models is generally lower compared to other considered models; however, under conditions of uncertainty, they are fully sufficient for modeling, optimizing, and controlling sulfur production processes.

In practice, when information is insufficient, it is necessary to use all available types of data to construct a model. A model built on such diverse information is called a *composite model*. However, constructing a composite model can be inefficient, as it requires organizing and conducting various types of experiments and studies, as well as preprocessing the collected data.

Mathematical Models of the Sulfur Production Block Reactors. As determined from the results of the systematic analysis above, the models of the Claus and thermal reactors are constructed based on various types of information, including aggregated and processed statistical data, results of expert evaluations processed using fuzzy set theory methods, and material and heat balance equations.

Table 1 - Results of the Systematic Analysis of Possible Model Types for the Main Units of the Sulfur Production Block

№	Main units of the sulfur production block	Criteria	Types of Models			
			Deterministic	Statistical	Fuzzy	Composed
1	2	3	4	5	6	7
1.1	**Reactors** (R-001, R-002, R-003)	Availability of required information	2.5	4.5	4.5	5.0
1.2		Cost of model development	1.0	4.0	3.5	3.0
1.3		Model accuracy	4.5	3.0	2.5	4.0
1.4		Applicability to the need	3.5	4.0	3.5	5.0
1.5		Possibility of integration into one package	4.0	3.5	3.5	3.5
1.6		Model adequacy	3.0	3.5	3.5	4.0
		Sum of prices	**18.5**	**22.5**	**21.5**	**24.5**
2.1	**Capacitors** (E-001, E-002, E-004)	Availability of required information	3.5	4.5	4.0	4.0
2.2		Cost of model development	1.5	4.0	3.5	3.0
2.3		Model accuracy	4.5	3.5	3.5	3.5
2.4		Applicability to the need	4.0	4.0	4.0	4.5
2.5		Possibility of integration into one package	4.5	4.0	4.0	4.0
2.6		Model adequacy	3.5	3.5	3.5	3.5
		Sum of prices	**21.5**	**23.5**	**22.5**	**22.5**
3.1	**Oven** (F-002)	Availability of required information	4.0	5.0	4.5	4.0
3.2		Cost of model development	3.0	5.0	4.0	4.0
3.3		Model accuracy	4.5	4.5	3.5	4.0
3.4		Applicability to the need	4.0	4.0	4.0	4.0
3.5		Possibility of integration into one package	4.0	4.5	4.0	5.0
3.6		Model adequacy	4.0	4.5	4.5	5.0
		Sum of prices	**23.5**	**27.5**	**24.5**	**25.0**
4.1	**Separators** (D-001, D-004)	Availability of required information	4.5	5.0	4.0	4.5
4.2		Cost of model development	3.0	5.0	4.0	2.5
4.3		Model accuracy	4.5	4.5	2.0	4.0
4.4		Applicability to the need	4.0	4.5	4.5	4.5
4.5		Possibility of integration into one package	3.5	4.0	3.5	4.0
4.6		Model adequacy	4.0	4.0	3.5	4.0
		Sum of prices	**23.5**	**27.0**	**21.5**	**23.5**

5.1	**Extractors** (B-001, B-002)	Availability of required information	4.5	4.0	4.0	4.5
5.2		Cost of model development	5.0	4.5	4.0	4.0
5.3		Model accuracy	5.0	4.0	4.0	4.5
5.4		Applicability to the need	4.5	4.5	4.0	4.5
5.5		Possibility of integration into one package	4.5	4.0	4.0	4.0
5.6		Model adequacy	4.5	4.0	4.0	4.5
		Sum of prices	**28.0**	**25.0**	**24.0**	**26.0**

Note: The evaluation (ranking) uses a score scale (1-5), where 1 represents the lowest score and 5 the highest. The scores may be fuzzy, i.e., expressed as fuzzy numbers.

To identify the mathematical models of the reactors as multiple structural and fuzzy regression models, the approach of sequentially adding regressors [22] is used, while a modified form of the least squares method is employed for parametric identification [23].

Thus, using the mentioned approach of sequentially adding regressors, the structure of the mathematical models of the reactors was obtained in the form of the following multiple and fuzzy regression equations:

$$y_{TR} = a_0 + \sum_{i=1}^{4} a_i x_i + \sum_{i=1}^{4}\sum_{k=1}^{4} a_{ik} x_i x_k \quad (1)$$

$$y_{RC} = a_0 + \sum_{i=5}^{7} a_i x_i + \sum_{i=5}^{7}\sum_{k=i}^{7} a_{ik} x_i x_k \quad (2)$$

$$\tilde{y}_S = \tilde{a}_0 + \sum_{i=5}^{7} \tilde{a}_i x_i + \sum_{i=5}^{7}\sum_{k=i}^{7} \tilde{a}_{ik} x_i x_k \quad (3)$$

$$\tilde{y}_W = \tilde{a}_0 + \sum_{i=1}^{7} \tilde{a}_i x_i + \sum_{i=5}^{7}\sum_{k=i}^{7} \tilde{a}_{ik} x_i x_k \quad (4)$$

where: y_{TR} - sulfur yield at the outlet of the thermal reactor; y_{RC} - sulfur yield at the outlet of the Claus reactor; qualitative indicators of the produced sulfur: $\tilde{y}_S$ - fuzzy estimate of the sulfur mass fraction (depending on grade, from 99.20% to 99.98%); $\tilde{y}_W$ - fuzzy estimate of the mass fraction of water in the product (depending on grade, from 1.0% to 0.2%); input and operating parameters of the reactors affecting the sulfur production process (x_i, $i = \overline{1,4}$; x_i, $i = \overline{5,7}$;): x_1 - feed to the thermal reactor (26–28 t/h); x_2 - temperature in the thermal reactor (1000–1413 °C); x_3 - temperature at the outlet of the thermal reactor (180–350 °C); x_4 - flow rate of combustion air in the thermal reactor (200–700 Nm³/h); x_5 - feed to the Claus reactor (6–8 t/h); x_6 - temperature at the inlet of the Claus reactor (180–290 °C); x_7 - temperature at the outlet of the Claus reactor (300-345 °C); a_0, a_i, a_{ik}, $i = \overline{1,4}$, $k = \overline{i,4}$; and $\tilde{a}_0, \tilde{a}_i, \tilde{a}_{ik}$, $i = \overline{5,7}$, $k = \overline{i,7}$; - regression coefficients to be identified (with crisp and fuzzy notations): constant term affecting the reactor outlet parameters $(a_0, \tilde{a}_0)$; linear effects (x_i) ; quadratic and interaction effects (x_{ik}).

The obtained models (1)-(4) had their regression coefficients identified using the REGRESS software package based on the modified least squares method.

Thus, the results of the parametric identification of the models describing the relationship between the sulfur yield at the reactor outlets and their input and operating parameters are as follows:

$$\begin{aligned} y_{TR} = f_1(x_1, x_2, x_4) =& 0.686792x_1 + 0.012480x_2 + 0.052000x_3 + 0.260000x_4 \\ &+ 0.025917x_1^2 + 0.0000090x_2^2 + 0.0002080x_3^2 + 0.00005200x_4^2 \\ &+ 0.000471x_1x_2 + 0.000589x_1x_4 + 0.0000250x_2x_4 + 0.000104x_3x_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{RC} = f_2(x_5, x_6, x_7) =& 0.6712330x_5 + 0.0171430x_6 + 0.0129230x_7 \\ &+ 0.0788140x_5^2 + 0.000058x_6^2 + 0.00003x_7^2 \\ &+ 0.000035x_5x_6 + 0.000589x_5x_7 + 0.0000250x_6x_7 \end{aligned}$$

The unknown fuzzy regression coefficients $\tilde{a}_0, \tilde{a}_i,\ i = \overline{5,7}$ and $\tilde{a}_{ik},\ i = \overline{5,7},\ k = \overline{i,7}$; of models (3) and (4), which describe the sulfur quality at the Claus reactor outlet, are evaluated using α-level sets with α = 0.5, 0.75, and 1.

As an example, we present $\tilde{y}_S$ - the identified fuzzy estimate of the sulfur mass fraction in the product at the Claus reactor outlet:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_S = f_3(x_5, x_6, x_7) =& (0.5/0.037008 + 0.75/0.037020 + 1/0.037033 + 0.75/0.037045 + 0.5/0.037057) \\ &\cdot x_5 + (0.5/0.076885 + 0.75/0.076900 + 1/0.076915 + 0.75/0.076930 \\ &+ 0.5/0.076945)x_6 - (0.5/0.169430 + 0.75/0.169455 + 1/0.169475 \\ &+ 0.75/0.169495 + 0.5/0.169520)x_7 + (0.5/0.000010 + 0.75/0.000020 \\ &+ 1/0.000027 + 0.75/0.000034 + 0.5/0.000044)x_5^2 + (0.5/0.000093 \\ &+ 0.75/0.000108 + 1/0.000118 + 0.75/0.000128 + 0.5/0.000143)x_6^2 \\ &- (0.5/0.000007 + 0.75/0.000057 + 1/0.000574 + 0.75/0.000157 \\ &+ 0.5/0.000207)x_7^2 + (0.5/0.000050 + 0.75/0.000070 + 1/0.000080 \\ &+ 0.75/0.000090 + 0.5/0.00011)x_5x_6 - (0.5/0.000045 + 0.75/0.000065 \\ &+ 1/0.000075 + 0.75/0.000085 + 0.5/0.000105)x_5x_7 \\ &- (0.5/0.000174 + 0.75/0.000199 + 1/0.000209 + 0.75/0.000219 \\ &+ 0.5/0.000244)x_6x_7 \end{aligned} \tag{5}$$

Results and Discussions. From the results of the systematic analysis of the possible model types for the main units of the existing sulfur production block at the Atyrau Oil Refinery, it is evident-from the sum of the criteria values (18.5, Table 1)-that due to the complexity of the reactors and the processes occurring within them, the difficulty of their study, and the impossibility of obtaining theoretical information and necessary data, constructing deterministic models for the reactors is practically infeasible or economically inefficient.

According to the evaluation results, statistical (stochastic) and fuzzy models for the reactors of the sulfur production block received relatively high scores (21.5; 22.5). However, based on the sum of the criteria values, the most effective type of model for the reactors is the composite model (24.5). In other words, it is necessary to construct composite models for the reactors.

For the pumps, based on the criteria scores, constructing a deterministic model is more advantageous (28.0) compared to other model types, meaning that a deterministic model is the most

efficient choice for them (Table 1). As shown in the table constructed on the basis of systems analysis, for the condensers, furnace, and separators, building statistical models is the most optimal solution (23.5; 27.5; 27, respectively).

In constructing models of the units included in a technological complex, a decomposition approach is often used, in which the models of each unit are developed individually, without considering the integration of the obtained models into a single system. Solving system-level modeling tasks in this isolated manner does not yield the desired efficiency or positive outcomes. Since the operation of an individual unit in a technological system is interconnected with the operations of other units, modeling and optimizing a single unit alone cannot fully improve the performance of the entire system. Therefore, to comprehensively address the issues of modeling and optimizing a technological system, it is necessary to create a package of interconnected models that accounts for the relationships between units. By using such a model package, it is possible to perform system-level modeling of the technological complex. Systemic modeling of the technological complex allows for the identification of “bottlenecks” that limit its operation, and addressing these issues can significantly increase the capacity and efficiency of the technological complex and its processes.

The integration of individual unit models into a single system (package) must be carried out in accordance with the operation of the technological complex process. In this case, the output of one model (the modeling results) serves as the input for another model (the initial data required for modeling), and this output may in turn be the input for a previous or another model. For example, in the sulfur production complex, the output of the E-001 condenser model - that is, its modeling results - serves as the input for the E-004 condenser model, and the results of modeling this condenser are then used as the input for the R-001 Claus reactor. In turn, the outputs of the Claus reactor models are required as input data for modeling the parallel-connected R-002 and R-003 reactors and the E-002 condenser.

The model describing the product of the Claus reactor, that is, the sulfur yield, was identified as a multiple regression model using experimental–statistical methods, while the models for assessing sulfur quality were constructed as fuzzy regression equations based on fuzzy information obtained from experts.

Conclusion. Based on the results of the systems analysis, a methodology for constructing mathematical models of technological facilities using various types of information has been formulated. According to the proposed methodology, the model of each unit of a technological complex is selected from among the possible types of models based on comparison and selection criteria, identifying the most effective model for that unit. The possible models of the main units of the sulfur production block were systematically analyzed, and the most efficient type of model to be constructed for each unit was determined.

Based on the conducted systems analysis and research results, the structure and parameters of the mathematical models of the reactors in the sulfur production block at the Atyrau Oil Refinery were identified using aggregated and processed information.

The model describing the relationship between the sulfur yield at the outlets of the thermal and Claus reactors and their input and operating parameters was identified in the form of multiple regression equations. The qualitative indicators of sulfur: the mass fractions of sulfur and water in the product at the outlet of the Claus reactor - were structurally identified as multiple fuzzy regression equations. Thus, in this work, using the example of the sulfur production block, a methodology for constructing a package of models for technological complexes consisting of interconnected units is presented, along with the results of its implementation.

Литература

1. Оразбаев Б.Б., Оразбаева К.Н., Жумадиллаева А.К., Шүйтенов Г.Ж. Зарыпхан М.Т. Разработка системы моделей взаимосвязанных реакторов блока производства серы Атырауского нефтеперерабатывающего завода // Вестник Университета Шакарима. -2025. -Т.2(18). -С.75-86. DOI 10.53360/2788-7995-2025-2(18)-9.

2. Мурзагалиева Т. Технология переработки нефти и газа: монография // Фолиант. - 2015. -192с. ISBN 978-601-302-124-9.

3. Zhao Zh-W., Wang D-H. Statistical inference for generalized random coefficient autoregressive model//Mathematical and Computer Modelling. -2012. -Vol.56. -P.152-166. DOI 10.1016/j.mcm.2011.12.002.

4. Нәдіров Н.К., Сармурзина Р.Ғ., Оразбаева К.Н. Мұнай өңдеу, мұнай химиясы технологиялық кешендерінің математикалық модельдерін ақпараттың жетіспеушілігі және айқын еместігі жағдайында құру тәсілін жасақтау// Доклады НАН РК. -2010. -№2. -Б.77-81.

5. Sharikov U.V., Petrov P.A. Universal model for catalytic reforming // Chemical and Petroleum Engineering. -2007. -Vol.43. -P.580-584. DOI 10.1007/s10556-007-0103-z.

6. Stampar S., Sokolic S., Karer G., Znidarsic A., Skrjanc I. Theoretical and fuzzy modelling of a pharmaceutical batch reactor // Mathematical and Computer Modelling. -2011. -Vol.53. -P.637-645. DOI 10.1016/j.mcm.2010.09.016.

7. Анчита Х. Переработка тяжелой нефти. Реакторы и моделирование процессов//Пер.с англ. под ред. Глаголевой О.Ф., Винокурова В.А. Издательство Профессия. -2015. -592 с. ISBN 978-5-91884-068-9.

8. Беккер В.Ф. Моделирование химико-технологических объектов управления: учебное пособие. -2-е изд. // РИОР. -2019. -142с. ISBN 978-5-369-01194-2, 978-5-16-006670-7.

9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. -12-е изд.// Издательство Юрайт. -2024. -480 с. ISBN 978-5-534-00859-3.

10. Акопов А.С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для вузов. -2-е изд.// М.: Издательство Юрайт. - 2024. - 426 с. ISBN 978-5-534-18379-5.

11. Кобелев Н.Б., Девятков В.В., Половников В.А. Имитационное моделирование: учебник. -2-е издание// КУРС. -2024. - 353с. ISBN 978-5-907228-65-8.

12. Воробьев С.Н., Гирина Н.В., Лазарев И.В., Осипов Л.А. Статистическое моделирование информационных систем: учебное пособие//Издательство ГУАП. -2010. -15 с. ISBN 978-5-8088-0596-5.

13. Афонин В.В., Федосин С.А. Моделирование систем: учебное пособие // Национальный Открытый Университет Интуит. -2016. - 269 с. ISBN 978-5-9963-0352-6.

14. Сериков Т.П., Оразбаева К.Н. Интенсификация технологических обьектов нефтепереработки на основе математических методов: монография // Эверо. -2006. -157 с. ISBN 9965-769-46-X.

15. Sabzi H.Z., King J.Ph., Abudu Sh. Developing an intelligent expert system for streamflow prediction, integrated in a dynamic decision support system for managing multiple reservoirs: A case study // Expert systems with applications. -2017. -Vol.83. -P.145–163. DOI 10.1016/j.eswa.2017.04.039.

16. Джарратано Д. Экспертные системы: принципы разработки и программирование: научное издание пер. с англ. -4-е изд.//Вильямс. -2007. -1152 с. ISBN 978-5-8459-1156-8, 0-534-38447-1.

17. Оразбаев Б.Б., Курмангазиева Л.Т., Коданова Ш.К. Теория и методы системного анализа// Издательство Академия Естествознания. -2017. -249с. ISBN 978-5-91327-498-4.

18. Dubois D. The role of fuzzy sets indecision sciences: Old techniques and new directions // Fuzzy Sets

Systems. -2011. -Vol.184. -P.3-28. DOI 10.1016/j.fss.2011.06.003.

19. Orazbayev B.B., Orazbayeva K.N., Utenova B.E. Development of Mathematical Models and Modeling of Chemical Engineering Systems under Uncertainty// Theoretical Foundations of Chemical Engineering. -2014. -Vol.48. -P.138-147. DOI 10.1134/S0040579514020092.

20. Калижанова А.У., Картбаев Т.С., Тогжанова К.О. Системный анализ: учебное пособие // АУЭС. -2020. -126 с. ISBN 978-601-7939-33-5.

21. Жұманов Қ.Б. Күкірт қышқылы өндірісі: оқу құралы // Фолиант. -2019. -160б. ISBN 978-601-338-012-4.

22. Валеев С.Г. Регрессивное моделирование при обработке наблюдений: монография // Наука. -1991. -272 с. ISBN: 5-02-014820-2, 9785020148208.

23. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления: учебное пособие // Самарский государственный технический университет. -2009. -126 с.

References

1. Orazbaev B.B., Orazbaeva K.N., Zhumadillaeva A.K., Shүjtenov G.Zh. Zaryphan M.T. Razrabotka sistemy modelej vzaimosvjazannyh reaktorov bloka proizvodstva sery Atyrauskogo neftepererabatyvajushhego zavoda // Vestnik Universiteta Shakarima. -2025. -T.2(18). -S.75-86. DOI 10.53360/2788-7995-2025-2(18)-9. [in Russian]

2. Murzagalieva T. Tehnologija pererabotki nefti i gaza: monografija // Foliant. - 2015. -192c. ISBN 978-601-302-124-9. [in Russian]

3. Zhao Zh-W., Wang D-H. Statistical inference for generalized random coefficient autoregressive model//Mathematical and Computer Modelling. -2012. -Vol.56. -P.152-166. DOI 10.1016/j.mcm.2011.12.002.

4. Nədirov N.K., Sarmurzina R.Ғ., Orazbaeva K.N. Mұnaj өңdeu, mұnaj himijasy tehnologijalyқ keshenderinің matematikalyқ model’ derin aқparattyң zhetispeushiligi zhəne ajқyn emestigi zhaғdajynda құru təsilin zhasaқtau// Doklady NAN RK. -2010. -№2. -B.77-81. [in Kazakh]

5. Sharikov U.V., Petrov P.A. Universal model for catalytic reforming // Chemical and Petroleum Engineering. -2007. -Vol.43. -P.580-584. DOI 10.1007/s10556-007-0103-z.

6. Stampar S., Sokolic S., Karer G., Znidarsic A., Skrjanc I. Theoretical and fuzzy modelling of a pharmaceutical batch reactor // Mathematical and Computer Modelling. -2011. -Vol.53. -P.637-645. DOI 10.1016/j.mcm.2010.09.016.

7. Anchita H. Pererabotka tjazheloj nefti. Reaktory i modelirovanie processov//Per.s angl. pod red. Glagolevoj O.F., Vinokurova V.A. Izdatel’ stvo Professija. -2015. -592 c. ISBN 978-5-91884-068-9. [in Russian]

8. Bekker V.F. Modelirovanie himiko-tehnologicheskih ob#ektov upravlenija: uchebnoe posobie. -2-e izd. // RIOR. -2019. -142c. ISBN 978-5-369-01194-2, 978-5-16-006670-7. [in Russian]

9. Gmurman V.E. Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika: uchebnik. -12-e izd. // Izdatel’ stvo Jurajt. -2024. - 480 s. ISBN 978-5-534-00859-3. [in Russian]

10. Akopov A.S. Imitacionnoe modelirovanie: uchebnik i praktikum dlja vuzov. -2-e izd. // M.: Izdatel’ stvo Jurajt. - 2024. - 426c. ISBN 978-5-534-18379-5. [in Russian]

11. Kobelev N.B., Devjatkov V.V., Polovnikov V.A. Imitacionnoe modelirovanie: uchebnik. -2-e izdanie// KURS. -2024. - 353c. ISBN 978-5-907228-65-8. [in Russian]

12. Vorob’ ev S.N., Girina N.V., Lazarev I.V., Osipov L.A. Statisticheskoe modelirovanie informacionnyh sistem: uchebnoe posobie//Izdatel’ stvo GUAP. -2010. -15 c. ISBN 978-5-8088-0596-5. [in Russian]

13. Afonin V.V., Fedosin S.A. Modelirovanie sistem: uchebnoe posobie // Nacional’ nyj Otkrytyj UniversitetIntuit. -2016. - 269 c. ISBN 978-5-9963-0352-6. [in Russian]

14. Serikov T.P., Orazbaeva K.N. Intensifikacija tehnologicheskih ob’ ektov neftepererabotki na osnove matematicheskih metodov: monografija // Jevero. -2006. -157 s. ISBN 9965-769-46-X. [in Russian]

15. Sabzi H.Z., King J.Ph., Abudu Sh. Developing an intelligent expert system for streamflow prediction, integrated in a dynamic decision support system for managing multiple reservoirs: A case study // Expert systems with applications. -2017. -Vol.83. -P.145–163. DOI 10.1016/j.eswa.2017.04.039.

16. Dzharratano D. Jekspertnye sistemy: principy razrabotki i programmirovanie: nauchnoe izdanie per. s angl. -4-e izd. //Vil’ jams. -2007. -1152 s. ISBN 978-5-8459-1156-8, 0-534-38447-1. [in Russian]

17. Orazbaev B.B., Kurmangazieva L.T., Kodanova Sh.K. Teorija i metody sistemnogo analiza// Izdatel’ stvo Akademija Estestvoznanija. -2017. -249s. ISBN 978-5-91327-498-4. [in Russian]

18. Dubois D. The role of fuzzy sets indecision sciences: Old techniques and new directions // Fuzzy Sets Systems. -2011. -Vol.184. -P.3-28. DOI 10.1016/j.fss.2011.06.003.

19. Orazbayev B.B., Orazbayeva K.N., Utenova B.E. Development of Mathematical Models and Modeling of Chemical Engineering Systems under Uncertainty// Theoretical Foundations of Chemical Engineering. -2014. -Vol.48. -P.138-147. DOI 10.1134/S0040579514020092.

20. Kalizhanova A.U., Kartbaev T.S., Togzhanova K.O. Sistemnyj analiz: uchebnoe posobie // AUJeS. -2020. -126s. ISBN 978-601-7939-33-5. [in Russian]

21. Zhұmanov Қ.B. Kүkirt қyshқyly өndirisi: oқu құraly // Foliant. -2019. -160b. ISBN 978-601-338-012-4. [in Kazakh]

22. Valeev S.G. Regressivnoe modelirovanie pri obrabotke nabljudenij: monografija // Nauka. -1991. -272c. ISBN: 5-02-014820-2, 9785020148208. [in Russian]

23. Diligenskaja A.N. Identifikacija ob#ektov upravlenija: uchebnoe posobie // Samarskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet. -2009. -126 s. [in Russian]

Information about the authors

Orazbayev B.B. - doctor of Technical Sciences professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: batyr_o@mail.ru;

Seit N.N. - Senior Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: nurgulnurmash@gmail.com.

Сведения об авторах

Оразбаев Б.Б. - доктор технических наук, профессор, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва, Астана, Казахстан, e-mail: batyr_o@mail.ru;

Сейт Н.Н. - старший преподаватель, Евразийский Национальный университет имени Л. Н. Гумилёва, Астана, Казахстан, e-mail: nurgulnurmash@gmail.com.

IRSTI 28.23.15 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1275**

BENCHMARKING CALIBRATED GRADIENT BOOSTING WITH BEHAVIOURAL FEATURES FOR TRANSACTION-LEVEL AML DETECTION

[1]T.K. Azbergen, [2]A.O. Tleubayeva, [1]A.T Aituarov, [1]Y.T. Sabyrzhan
[1]Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan,
[2]Astana IT University, Astana, Kazakhstan

Corresponding-author: Arailym.tll@gmail.com

Reliable transaction-level anti-money-laundering (AML) systems require not only accurate ranking of suspicious activity but also well-calibrated probabilistic risk estimates to support operational decision-making and risk prioritisation. In this context, this work provides an empirical evaluation of calibrated gradient boosting models with temporal behavioural features, focusing on the combined impact of probabilistic calibration and behavioural feature modelling on probability reliability and operationally relevant performance metrics.

The proposed framework integrates gradient boosting algorithms (CatBoost and XGBoost) with post-hoc probability calibration techniques (Platt scaling and isotonic regression) and behavioural features computed over rolling time windows of 1, 7, and 30 days to capture both short-term volatility and longer-term transaction patterns. Experimental evaluation is conducted on the publicly available IBM Anti-Money Laundering (IBM–AML) dataset, which contains approximately seven million synthetic transactions simulating realistic banking activity.

Model performance is assessed using ranking-, calibration-, and operationally oriented metrics, including AUPRC, AUROC, Brier score, Precision@Top k, and Lift@Top k. Among the evaluated baselines, the calibrated CatBoost model showed the strongest overall performance among the evaluated baselines (AUPRC = 0.367, AUROC = 0.959, Brier = 0.0062, Lift@1% = 40.9).

The results indicate that probability calibration improves the reliability of predicted risk scores without degrading ranking performance, while temporal behavioural features contribute to improved detection sensitivity in highly imbalanced settings. This study provides empirical evidence and methodological clarity regarding the role of calibration and behavioural dynamics in AML systems and offers a benchmark-ready кexperimental pipeline for future research. The applicability of the findings to real-world AML systems is discussed in light of the synthetic nature of the dataset, and directions for further validation on real banking data are outlined.

Keywords: machine learning, anti-money laundering, CatBoost, probabilistic calibration, behavioural features, financial fraud detection, explainable AI.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЛИБРОВАННОГО ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА С ПОВЕДЕНЧЕСКИМИ ПРИЗНАКАМИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОТМЫВАНИЯ ДЕНЕГ НА УРОВНЕ ТРАНЗАКЦИЙ

[1]Т.К. Азберген, [2]А.О. Тлеубаева, [1]А.Т. Айтуов, [1]Е.Т. Сабыржан
[1]Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан,
[2]Astana IT University, Астана, Казахстан,
e-mail: Arailym.tll@gmail.com

Надёжные системы противодействия отмыванию денег (AML) на уровне отдельных транзакций требуют не только точного ранжирования подозрительной активности, но и хорошо откалиброванных вероятностных оценок риска для поддержки операционных решений и приоритизации проверок. В этом контексте в работе представлена эмпирическая оценка калиброванных моделей градиентного бустинга с временными поведенческими признаками, направленная на анализ совместного влияния вероятностной калибровки и моделирования поведенческих признаков на надёжность вероятностных оценок и операционно значимые показатели эффективности.

Предложенная структура объединяет алгоритмы градиентного бустинга (CatBoost и XGBoost) с методами пост-калибровки вероятностей (Platt scaling и изотоническая регрессия), а также поведенческие признаки, вычисляемые в скользящих временных окнах продолжительностью 1, 7 и 30 дней, что позволяет учитывать, как краткосрочную волатильность, так и долгосрочные транзакционные паттерны. Экспериментальная оценка проведена на открытом наборе данных IBM Anti-Money Laundering (IBM–AML), содержащем около семи миллионов синтетических транзакций, имитирующих реалистичную банковскую деятельность.

Качество моделей оценивается с использованием ранжирующих, калибровочных и операционно ориентированных метрик, включая AUPRC, AUROC, Brier score, Precision@Top k и Lift@Top k. Среди рассмотренных базовых моделей калиброванная модель CatBoost продемонстрировал самые высокие общие показатели среди оцененных базовых показателей (AUPRC = 0.367, AUROC = 0.959, Brier = 0.0062, Lift@1% = 40.9).

Полученные результаты показывают, что вероятностная калибровка повышает надёжность прогнозируемых риск-оценок без ухудшения качества ранжирования, в то время как временные поведенческие признаки способствуют повышению чувствительности выявления в условиях сильного дисбаланса классов. Работа предоставляет эмпирические доказательства и методологическую ясность относительно роли калибровки и поведенческой динамики в AML-системах, а также предлагает воспроизводимую экспериментальную основу для дальнейших исследований. Применимость полученных выводов к реальным AML-системам обсуждается с учётом синтетической природы используемого набора данных, а также обозначаются направления дальнейшей валидации на реальных банковских данных.

Ключевые слова: машинное обучение, отмывание денег, CatBoost, вероятностная калибровка, поведенческие признаки, финансовое мошенничество, объяснимая ИИ.

ТРАНЗАКЦИЯЛАР ДЕҢГЕЙІНДЕ АҚШАНЫ ЖЫЛЫСТАТУДЫ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН МІНЕЗ-ҚҰЛЫҚТЫҚ БЕЛГІЛЕРГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН КАЛИБРЛЕНГЕН ГРАДИЕНТТІ БУСТИНГТІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ БАҒАЛАНУЫ

[1]Т.К. Азберген, [2]А.О. Тлеубаева✉, [1]А.Т. Айтуов, [1]Е.Т. Сабыржан

[1]Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан,

[2]Astana IT University, Астана, Казахстан,

e-mail: Arailym.tll@gmail.com

Транзакциялар деңгейіндегі ақшаны жылыстатуға қарсы (AML) сенімді жүйелер күдікті әрекеттерді дәл ранжирлеумен қатар, операциялық шешім қабылдау мен тәуекелдерді басымдықпен қарау үшін жақсы калибрленген ықтималдықтық тәуекел бағаларын талап етеді. Осы тұрғыда бұл жұмыста уақыттық мінез-құлықтық белгілерді қолданатын калибрленген градиентті бустинг модельдерінің эмпирикалық бағалануы ұсынылады және ықтималдық калибрлеу мен мінез-құлықтық белгілерді модельдеудің ықтималдық бағалардың сенімділігіне және операциялық тұрғыдан маңызды тиімділік көрсеткіштеріне бірлескен әсері талданады.

Ұсынылған құрылым градиентті бустинг алгоритмдерін (CatBoost және XGBoost) ықтималдықтарды пост-калибрлеу әдістерімен (Platt scaling және изотондық регрессия) біріктіреді, сондай-ақ 1, 7 және 30 күндік жылжымалы уақыттық терезелерде есептелетін мінез-құлықтық белгілерді пайдаланады. Бұл тәсіл қысқа мерзімді құбылмалылықты да, ұзақ мерзімді транзакциялық үлгілерді де қамтуға мүмкіндік береді. Эксперименттік бағалау нақты банктік қызметті модельдейтін шамамен жеті миллион синтетикалық транзакциядан тұратын IBM Anti-Money Laundering (IBM–AML) ашық деректер жиынтығында жүргізілді.

Модельдердің тиімділігі ранжирлеу, калибрлеу және операциялық бағытталған метрикалар арқылы бағаланды, олардың қатарына AUPRC, AUROC, Brier көрсеткіші, Precision@Top k және

Lift@Top k жатады. Қарастырылған базалық модельдер арасында калибрленген CatBoost бағаланған базалық көрсеткіштер арасында ең жоғары жалпы көрсеткіштерді көрсетті (AUPRC = 0.367, AUROC = 0.959, Brier = 0.0062, Lift@1% = 40.9).

Нәтижелер ықтималдық калибрлеудің модельдің ранжирлеу қабілетін төмендетпей, болжанған тәуекел бағаларының сенімділігін арттыратынын, ал уақыттық мінез-құлықтық белгілердің сыныптар қатты теңгерімсіз болған жағдайда анықтау сезімталдығын күшейтетінін көрсетеді. Зерттеу AML жүйелеріндегі калибрлеу мен мінез-құлықтық динамиканың рөліне қатысты эмпирикалық дәлелдер мен әдістемелік айқындықты ұсынады және болашақ зерттеулер үшін қайта өндіруге болатын эксперименттік негіз қалыптастырады. Алынған нәтижелердің нақты AML жүйелеріне қолданылу мүмкіндігі пайдаланылған деректер жиынтығының синтетикалық сипатын ескере отырып талқыланып, нақты банктік деректерде қосымша валидация жүргізу бағыттары айқындалады.

Түйін сөздер: машиналық оқыту, ақшаны жылыстату, CatBoost, ықтималдық калибрлеу, мінез-құлықтық ерекшеліктер, қаржылық алаяқтық, түсіндірілетін жасанды интеллект.

Introduction. Money laundering (AML) remains one of the most persistent challenges to global financial stability, affecting both the integrity of banking institutions and the credibility of regulatory systems. According to the Financial Action Task Force (FATF), illicit financial flows represent approximately 2-5% of global GDP, illustrating the magnitude of the threat and the necessity for advanced analytical tools to counteract it. The rapid evolution of laundering schemes, the expansion of digital banking platforms, and the increasing complexity of transactional ecosystems have made the detection of suspicious activity a pressing global priority [1].

Traditional rule-based AML systems, which have long dominated industry practice, rely on static thresholds, expert-defined rules, and manually specified behavioural heuristics [2]. While these systems are transparent and straightforward to audit, they exhibit several critical limitations. They tend to produce excessively high false-positive rates-often exceeding 90% of all alerts [3], which leads to a heavy compliance burden, inflated operational costs, and reduced confidence in automated systems. Moreover, rule-based models struggle to adapt to new or evolving laundering typologies, as their decision logic remains fixed once deployed.

In contrast, machine learning (ML) offers a data-driven and adaptive alternative capable of identifying complex behavioural and temporal patterns in financial transactions [4]. ML-based approaches enable dynamic adjustment to new data distributions, capture non-linear relationships, and provide improved detection performance across heterogeneous client profiles and transaction types [5]. This shift reflects a broader paradigm in financial monitoring: from deterministic rules toward statistically grounded, probabilistically interpretable models that learn from empirical evidence.

Recent studies have highlighted the effectiveness of supervised ML models in AML detection, frequently reporting that gradient boosting methods-such as XGBoost, LightGBM, and CatBoost-outperform traditional rule-based heuristics in identifying suspicious transactions. However, reported performance gains are often highly sensitive to feature construction strategies, data-splitting protocols, and the choice of evaluation metrics. In particular, much of the existing literature prioritises global discrimination measures, such as the area under the receiver operating characteristic curve (ROC-AUC) and the F1-score, while giving comparatively limited attention to probability reliability and operational prioritization [6].

As a result, despite achieving strong ranking performance, many AML models produce risk scores whose probabilistic interpretation is unclear or unreliable, limiting their usefulness for risk-based decision-making in compliance workflows. Two aspects are especially critical in this regard. First, probability calibration ensures that predicted risk scores correspond to empirically valid probabilities, enabling consistent prioritisation of

alerts under constrained review resources. Second, temporal behavioural representation captures the dynamic evolution of client activity over time, rather than relying on static transaction snapshots, thereby improving sensitivity to subtle and emerging laundering patterns.

In parallel, graph-based learning approaches have been explored to represent financial systems as networks of interconnected accounts, entities, and transactions. Graph Neural Networks (GNNs) [7], including Graph Convolutional Networks (GCNs) [8], dynamic GNN architectures such as MDGC-LSTM [9], and multi-view formulations such as LineMVGNN [10], have demonstrated promise in modelling multi-stage laundering schemes and uncovering hidden relational dependencies. Nevertheless, many graph-based AML models rely on uncalibrated outputs and provide limited temporal context, which can constrain their interpretability, stability, and suitability for operational compliance settings.

Compared to prior work, existing behavioural ML approaches [6] primarily emphasise feature design and anomaly sensitivity, but typically evaluate models using discrimination-focused metrics without explicitly addressing probability calibration or operational prioritisation. At the same time, recent graph-based AML studies [7-10] demonstrate the value of relational representations for uncovering complex laundering structures, yet often rely on uncalibrated outputs and lack systematic temporal aggregation aligned with real monitoring workflows. As a result, probability reliability and risk score interpretability-both critical for compliance decision-making-remain underexplored in much of the existing literature.

Taken together, these observations highlight a clear research gap. Existing AML models rarely combine temporal behavioural modelling, probability calibration, and graph-based contextual learning within a unified, reproducible framework. Consequently, this study aims to empirically investigate this gap by evaluating how calibration-aware and behaviour-aware machine-learning pipelines perform under operationally relevant AML metrics, rather than by proposing a new detection paradigm.

Accordingly, this work is positioned as an empirical evaluation study. The main contribution is an empirically grounded evaluation protocol that jointly analyses calibration, behavioural temporal features, and operational top-k metrics within a reproducible benchmark setting.

The object of this research is the process of detecting and classifying suspicious financial transactions within an AML system. The subject of the research is the application of calibrated and behaviour-aware machine-learning methods for improving the reliability of AML risk scoring. The purpose of the study is to empirically assess an integrated AML framework that combines temporal behavioural features and probabilistic calibration under ranking- and operation-oriented evaluation criteria.

This work is based on the hypothesis that the integration of temporal behavioural features and probability calibration can improve ranking stability and probability reliability in highly imbalanced AML detection tasks. Specifically, calibrated boosting algorithms such as CatBoost, when combined with rolling behavioural features, can yield more stable and better-calibrated AML risk scores than uncalibrated or purely graph-based models.

Accordingly, the study pursues the following objectives:

To critically analyse the limitations of rule-based and conventional ML approaches in AML detection.

- To design a behavioural feature-engineering pipeline that captures temporal transaction dynamics through rolling windows of 1, 7, and 30 days.

- To implement and compare probability calibration techniques, including Platt scaling and isotonic regression.

- To evaluate and contrast the performance of calibrated boosting models (CatBoost, XGBoost) and graph-based architectures (EdgeSAGE) on a unified dataset.

- To develop a reproducible experimental framework based on the IBM-AML dataset, enabling transparent benchmarking for future research.

The methodological framework combines supervised learning, probability calibration, and graph-based analysis. Feature engineering incorporates rolling behavioural statistics to capture temporal variability in transaction activity.

The dataset employed - the IBM Anti-Money Laundering (AML) dataset provides a realistic synthetic simulation of financial transactions [11]. Model performance is assessed using ranking metrics (AUPRC, AUROC) [12], calibration metrics (Brier score, reliability curves) [13], and operational metrics (Precision@Top k, Lift@Top k) [14]. All experiments follow a temporal data-splitting strategy to preserve chronological order and simulate realistic monitoring scenarios.

The scientific novelty of this study does not consist in the development of a fundamentally new machine-learning algorithm. Instead, it lies in a structured and reproducible empirical analysis of how temporal behavioural modelling and probabilistic calibration jointly affect reliability and operational interpretability in AML detection tasks.

Unlike prior research focused primarily on discrimination accuracy, this work emphasises probability reliability and operational evaluation metrics as complementary dimensions of AML model assessment. This focus is motivated by the practical need to support risk prioritisation and auditability, where relative ranking alone is insufficient without reliable probability estimates.

The theoretical significance of the study lies in advancing empirical understanding of calibration-aware and behaviour-aware machine-learning approaches in financial compliance.

The practical significance is reflected in a benchmark-ready evaluation pipeline that can support future comparative studies and validation on real-world financial data.

Materials and methods. The experiments were conducted using the IBM Anti-Money Laundering (AML) dataset, a publicly available synthetic dataset designed to emulate real-world financial transactions. It contains approximately 7 million transaction records, representing a virtual banking environment with both legitimate and illicit financial activities. Each transaction includes structured attributes describing the sender, receiver, transaction amount, currency, payment type, and temporal information.

Since the original dataset is highly imbalanced, with an approximate ratio of 1:200 between suspicious and non-suspicious transactions, a stratified sampling procedure was applied prior to model training to reduce the dataset size while preserving the original class distribution. Temporal ordering was maintained during the train-validation-test split to prevent information leakage, resulting in a manageable and statistically representative subset of approximately 1.5 million records suitable for training and evaluation.

To maintain temporal consistency and reflect real monitoring conditions, a chronological data split was employed:

- 70% of transactions for training,

- 15% for validation, and

- 15% for testing.

This temporal partition prevents information leakage and allows for backtesting across monthly periods (e.g., 2022-09) to assess model stability over time.

Feature engineering is central to this study and aims to capture behavioural and temporal patterns in transaction dynamics.

Three major feature categories were developed:

1. Categorical features - nominal attributes describing transaction type, currency, bank identifier, and payment format (≈5 variables). These were encoded using target or one-hot encoding depending on cardinality.

2. Quantitative features - numerical indicators such as transaction amount, average, standard deviation, and count of transactions.

3. Behavioural rolling features - temporal aggregates computed over 1-, 7-, and 30-day sliding

windows, including:

- mean and median transaction values;

- transaction count per window;

- rolling sum and deviation (MAD, standard deviation) [15].

These features represent short-term and long-term behavioural trends, allowing the model to detect deviations from normal patterns that may indicate laundering activities.
All numerical features were scaled using z-score normalization, and missing values were handled through median imputation.

The proposed AML detection framework integrates both classical machine-learning models and graph-based architectures, enabling comparative evaluation of their predictive and operational effectiveness.

Four supervised learning algorithms were trained on the tabular feature set:

1. Logistic Regression (LR) - interpretable linear baseline;

2. Random Forest (RF) - ensemble of decision trees for non-linear modelling;

3. XGBoost - gradient boosting framework with efficient regularization;

4. CatBoost - categorical boosting model optimized for mixed data types.

CatBoost and XGBoost were selected as primary baselines because gradient boosting is a widely adopted and highly effective model class for heterogeneous tabular data, including imbalanced classification settings [16, 17]. CatBoost additionally provides built-in mechanisms for handling categorical features and was designed to reduce prediction shift caused by target leakage during boosting, which is beneficial in mixed-type transaction data [18].

We focused on CatBoost and XGBoost as representative, widely deployed gradient-boosting implementations with mature open-source ecosystems and strong empirical performance on heterogeneous tabular data. LightGBM was not included to keep the benchmark compact and avoid overlapping baselines with similar inductive bias under the same feature set; its inclusion is left for future extensions of the benchmark. Neural tabular models were deprioritised due to higher optimisation complexity and stronger dependence on tuning choices, which can increase training variance in operational pipelines.

Alternative deep neural models were not prioritised due to higher optimisation complexity and stronger dependence on training and tuning choices, which can increase variance and computational cost in practical tabular pipelines [19, 20]. Graph neural networks were included as a conceptual baseline for relational learning over account–transaction graphs, following standard inductive graph representation learning frameworks [21, 22].

Each model was trained using a binary classification objective (isMoneyLaundering = 1 vs.0), with class weights adjusted to counter data imbalance.

Hyperparameters were optimized on the validation set via grid search, with early stopping based on validation AUPRC. To reduce sensitivity to hyperparameter choice, all models were evaluated using fixed validation-based configurations, and performance stability was assessed through temporal backtesting and feature ablation experiments.

To assess robustness with respect to hyperparameter choice, the following tuning policy was adopted. Hyperparameter search was intentionally constrained to a compact grid to reduce variance and avoid overfitting to a single validation period, in line with established recommendations for ensemble models [23]. Gradient boosting methods are known to exhibit relatively low sensitivity to moderate variations in depth and learning rate due to their ensemble structure [17]. In our experiments, CatBoost and XGBoost demonstrated stable performance across reasonable hyperparameter ranges, with only minor fluctuations in AUPRC and top-k operational metrics, while post-hoc probability calibration consistently improved the Brier score, as expected from prior calibration studies [17,24].

To enhance interpretability and improve risk-based ranking, model outputs were calibrated using two standard post-processing techniques:

1. Platt Scaling (Sigmoid Calibration) - fits a logistic regression model on validation predictions [25];

2. Isotonic Regression - non-parametric monotonic mapping to align predicted probabilities with empirical frequencies [24].

3. Calibration models were fitted on the validation set and applied to test predictions to ensure unbiased evaluation.

Calibration was applied to improve probability reliability and was evaluated using the Brier score and reliability diagrams in the Results section.

In addition to tabular ML models, a graph-based EdgeSAGE model was implemented. The transaction network was constructed by connecting nodes representing accounts through edges representing transactions [22].

Each edge carried feature vectors derived from the transaction attributes. The EdgeSAGE model aggregated information from neighbouring nodes to predict the likelihood of a transaction being suspicious.

The EdgeSAGE model was included as a graph-based baseline to enable comparative evaluation with tabular models under the same experimental conditions.

Model performance was evaluated using three complementary groups of metrics designed to capture ranking quality, probabilistic calibration, and operational effectiveness.

Given the strong class imbalance of the AML dataset (approximately 1:200), ranking and precision-based metrics were prioritised over accuracy-based measures to provide a more realistic assessment of detection capability.

Model calibration was performed using Platt scaling [25] and isotonic regression [24], fitted on validation predictions.

The AUPRC quantifies the trade-off between precision and recall across varying decision thresholds, making it particularly suitable for highly imbalanced datasets such as AML detection.

Precision (P) and Recall (R) are defined as:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad \text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{1}$$

where:

- TP - number of true positives (correctly identified suspicious transactions),

- FP - number of false positives,

- FN - number of false negatives.

The area under the curve (AUPRC) is then computed as the integral of precision with respect to recall:

$$\text{AUPRC} = \int_0^1 P(R)\, dR \tag{2}$$

Higher AUROC indicates better ranking of positive (suspicious) instances among top risk scores.

The AUROC evaluates the model's ability to discriminate between positive and negative classes across all thresholds. It is defined as the probability that a randomly chosen positive instance receives a higher predicted score than a randomly chosen negative instance:

$$\text{AUROC} = \int_0^1 TPR(FPR)\, dFPR \tag{3}$$

where:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}, \quad FPR = \frac{FP}{FP + TN} \tag{4}$$

and TN denotes true negatives. While AUROC is a standard indicator of model discrimination, AUPRC is generally more informative for imbalanced AML data where false negatives are critical.

The Brier score (BS) measures the mean squared difference between predicted probabilities (p_i) and actual outcomes (y_i):

$$\text{Brier score} = \frac{1}{N} i = 1N \left(\widehat{p}_i - y_i\right)^2 \tag{5}$$

where:

- $p_i \in [0,1]$ is the predicted probability of laundering for transaction i,

- $y_i \in \{0,1\}$ is the ground-truth label,

- N is the number of samples

A lower Brier score indicates better probabilistic reliability and calibration of the model.

To visually assess calibration, a reliability (calibration) curve plots the average predicted probability against the observed frequency of positive cases in corresponding probability bins.

Perfect calibration corresponds to the diagonal y=x, y=x.

Deviations from this line indicate overconfidence (predicted probabilities too high) or underconfidence (too low). In AML contexts, well-calibrated risk scores are essential for prioritising transactions according to realistic probability estimates rather than arbitrary ranking.

To reflect resource-constrained review settings, models are evaluated under top-k selection scenarios, where only the highest-ranked transactions are examined.

Precision@Topk measures the proportion of true positives within the top $k\%$ of transactions with the highest predicted scores:

$$\text{PrecisionTopk} = TP_k TPk + FPk \qquad (6)$$

where TPk and FPk denote true and false positives among the top $k\%$ ranked cases.

Recall@Top k measures how many of the actual laundering cases are captured in the top $k\%$ predictions:

$$\text{RecallTopk} = TP_k TP \qquad (7)$$

This metric reflects the system's ability to capture critical alerts within the operational review budget (e.g., the top 1% of transactions reviewed daily by analysts).

The Lift metric quantifies how much better the model performs than random selection at a given cutoff. It is computed as the ratio between the model's Precision@Top k and the base rate of positives in the dataset:

$$LiftatTopk = \frac{\text{Precision at Top } k}{P_{\text{base}}}, \quad P_{\text{base}} = \frac{TP + FP}{N} \qquad (8)$$

Higher Lift@k values indicate a greater concentration of true positive cases within the top-ranked transactions compared to random selection. In applied AML evaluation scenarios, Lift@1% values above 30× are commonly interpreted as indicating a high concentration of detected cases within a limited review subset.

Results and discussion. The experimental evaluation was conducted on the IBM-AML dataset [11], comprising several million synthetic financial transactions that simulate realistic banking behaviour, including both legitimate and laundering operations.

The performance of multiple machine-learning models -Logistic Regression, Random Forest, XGBoost, CatBoost, and a Graph Neural Network (EdgeSAGE) - was assessed using three complementary groups of metrics: ranking, calibration, and operational effectiveness.

Table 1 summarises the comparative performance of all baseline models evaluated on the IBM-AML dataset.

In contrast to prior studies focusing primarily on ROC-AUC or F1-score optimisation [3,5], the present results indicate that calibration-aware models can improve probability reliability without sacrificing ranking performance.

This observation complements behavioural feature-based approaches [6] by quantifying calibration effects under operational AML metrics.

The CatBoost model with Platt calibration achieved the strongest overall performance among the evaluated models under the selected ranking, calibration, and operational metrics, with an AUPRC of 0.367 and Lift@1% of 40.9×, indicating that a large proportion of true laundering cases is concentrated within the top-ranked transactions.

Table 1 - Performance comparison of baseline models on the IBM-AML dataset

Model	AUPRC	AUROC	Brier	Precision@1%	Recall@1%	Lift@1%
Logistic Regression	0.0479	0.894	0.0067	0.069	0.099	9.9×
Random Forest	0.0904	0.913	0.0066	0.153	0.219	21.9×
XGBoost (cal.)	0.1680	0.946	0.0062	0.196	0.282	28.2×
CatBoost (cal.)	**0.3674**	**0.959**	**0.0062**	**0.285**	**0.409**	**40.9×**
Graph Neural Network (EdgeSAGE)	0.0110	0.666	0.772	0.007	0.009	0.9×

This corresponds to an approximately four-fold improvement in operational precision relative to XGBoost and a substantial gain over random selection under the chosen top-k operational setting. The Brier score of 0.0062 indicates strong probabilistic calibration, reflecting improved alignment between predicted risk scores and observed event frequencies. These estimates are specific to the IBM-AML benchmark and may not directly transfer to real-world deployments.

In contrast, the Graph Neural Network (EdgeSAGE) underperformed substantially (AUPRC = 0.011, AUROC = 0.666), primarily due to the limited depth of neighbourhood aggregation and absence of temporal contextualisation.

This result highlights the critical role of behavioural and temporal dynamics in AML detection, which conventional GNNs, when applied without explicit temporal modelling, may not adequately capture. Table 2 presents a focused comparison of CatBoost models before and after probability calibration

Table 2 - Effect of probability calibration on CatBoost performance

Model	AUPRC	Brier	Precision@1%	Recall@1%	Lift@1%
Uncalibrated CatBoost	0.3674	0.1031	0.285	0.409	40.9×
Platt (Sigmoid) Calibration	**0.3674**	**0.0062**	**0.285**	**0.409**	**40.9×**
Isotonic Calibration	0.3439	**0.0054**	0.281	0.403	40.4×

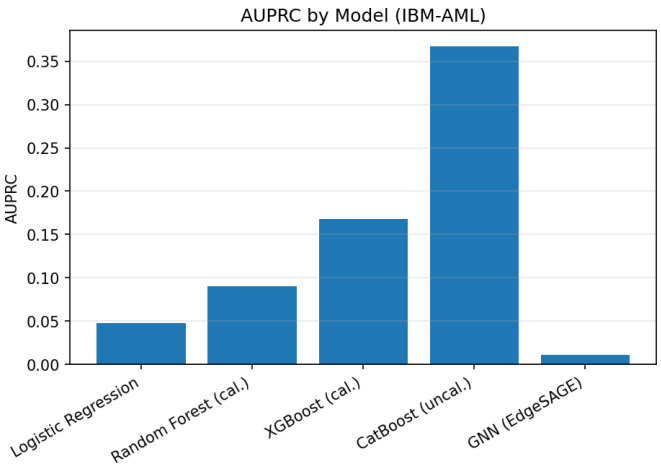


Fig.1 - AUPRC by model on the IBM-AML dataset

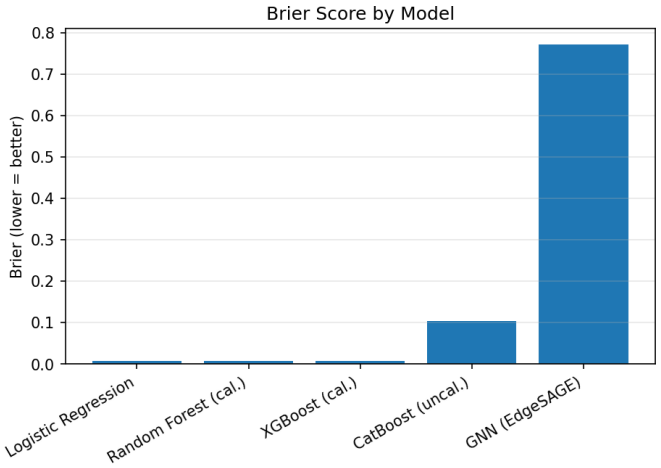


Fig.2 - Brier Score by model

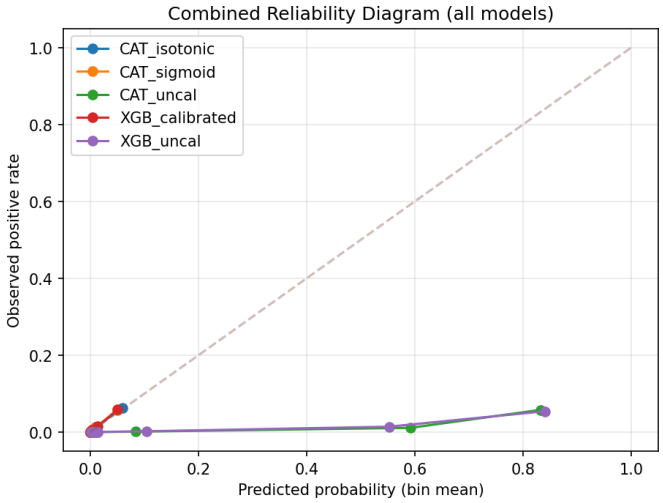


Fig.3 - Combined reliability diagram for all models

Both Platt scaling and isotonic regression markedly improved probability reliability without reducing ranking accuracy.

Although AUPRC remained nearly constant, the Brier score decreased by nearly **17×**, confirming a major enhancement in the model's probabilistic consistency.

Between the two techniques, isotonic regression achieved marginally better local calibration (lower Brier) but incurred a slight global ranking penalty (AUPRC ↓ 0.024).

Figure 1 shows that CatBoost outperforms all other models in AUPRC. Figure 2 compares Brier scores, confirming superior calibration, while Figure 3 presents reliability curves indicating near-linear alignment between predicted and empirical probabilities, suggesting improved probability interpretability.

To analyse the impact of temporal and dispersion-based behavioural features, an ablation study was performed by sequentially excluding specific feature groups. Table 3 summarises the results.

Table 3 - Ablation results for behavioural features

Removed Feature Group	ΔAUPRC	ΔLift@1%	Interpretation
1-Day Rolling Window	−0.012	−2.0×	Short-term volatility features improve responsiveness to rapid behaviour changes.
MAD (Mean Absolute Deviation)	−0.008	−1.5×	Dispersion-based features enhance anomaly sensitivity in low-signal regions.
Both (1-Day + MAD)	**−0.023**	**−4.0×**	Combined removal leads to noticeable degradation in ranking precision.

These results indicate that short-term (1-day) and dispersion (MAD) features make a substantial contribution to AML detection sensitivity, particularly in rare-event contexts.

Their removal caused a measurable degradation in both AUPRC and Lift@1 %, indicating that behavioural temporal dynamics play an important role in robust detection.

A backtesting experiment was conducted on the September 2022 period to evaluate model robustness across time. To assess the temporal robustness of the proposed models, a backtesting

analysis was conducted on the September 2022 transaction period. The results are presented in Table 4 and visualised in Figure 4.

Table 4 - Monthly backtesting results (AUPRC) on the IBM-AML dataset

Month	AUPRC (XGB)	AUPRC (CAT)	n (Transactions)
2022-09	0.1784	0.3674	107 484

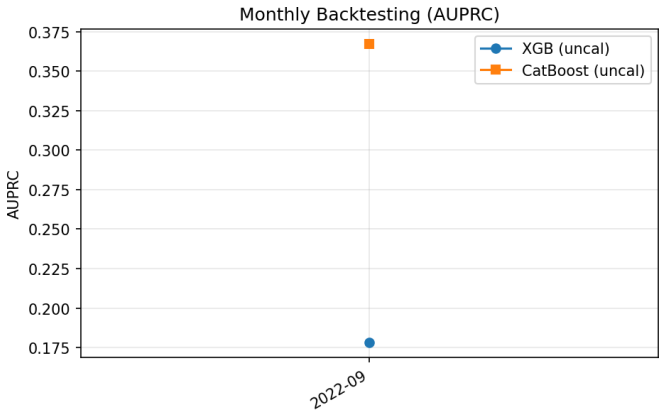


Fig. 4 - Temporal backtesting results (AUPRC): comparison of CatBoost and XGBoost models on the September 2022 transaction period

CatBoost maintained stable AUPRC ≈ 0.37 across time, outperforming XGBoost (0.18). This temporal robustness indicates resilience to distribution shifts, an important consideration for operational AML settings.

However, analysis revealed clusters of false positives among accounts exhibiting short-term transaction bursts (e.g., payroll disbursements or high-frequency business activity). These legitimate but transient patterns can be misclassified as laundering. Future work will incorporate temporal decay factors and entity-type embeddings to distinguish transient anomalies from systematic laundering behaviour.

The combined analysis supports the hypothesis that calibrated, behaviour-aware models outperform both uncalibrated and purely graph-based approaches. Behavioural rolling features enhance sensitivity to dynamic patterns, while probability calibration ensures reliability and interpretability of risk scores.

From an operational perspective, the calibrated CatBoost model concentrates a substantially higher proportion of true positives within the top-ranked transactions, which may support more efficient prioritisation in AML review processes.

At the same time, these results should be interpreted as indicative, as operational deployment would require additional validation, integration, and regulatory assessment.

Nonetheless, the use of a synthetic dataset (IBM-AML) constitutes a limitation, as it may not fully reflect the diversity and noise of real-world financial data. Future research will expand this framework using multi-institutional datasets, temporal graph neural networks (TGNNs), and explainability methods (SHAP, LIME) to enhance interpretability and cross-domain generalisation.

In summary, the results indicate that integrating temporal behavioural modelling with probabilistic calibration improves ranking stability and probability reliability in transaction-level AML detection. Behavioural rolling features enhance sensitivity to dynamic patterns, while post-hoc

calibration improves the consistency of predicted risk scores.

At the same time, the reliance on a synthetic dataset (IBM-AML) constitutes a limitation, and the reported findings should be interpreted as indicative rather than directly transferable to production environments. Further validation on real-world banking data, along with the incorporation of temporal graph-based models and explainability techniques, is necessary to assess practical applicability.

A key limitations of this study is the reliance on a synthetic dataset (IBM–AML), which, although widely used in academic research, may not fully capture the heterogeneity, noise, and adaptive behaviour observed in real-world financial systems.

As a result, the reported performance metrics should be interpreted as indicative rather than directly transferable to production AML environments.

Future work will therefore focus on validation using real or quasi-real multi-institutional datasets.

Ethical considerations. This study uses a publicly available synthetic dataset and does not involve personal or confidential financial records. Nevertheless, automated AML decision support may introduce risks related to false positives, biased prioritisation, and accountability; therefore, future work on real-world deployment will include fairness, explainability, and governance-oriented evaluation.

Conclusion. This study presented a reproducible machine-learning framework for transaction-level anti-money-laundering (AML) detection that integrates temporal behavioural feature modelling with probabilistic calibration. Experimental evaluation on the IBM Anti-Money Laundering (IBM-AML) dataset demonstrated that calibrated gradient boosting models, particularly CatBoost, achieve strong ranking performance while improving probability, reliability, as reflected by a low Brier score and stable operational metrics.

The results provide empirical evidence that the combination of rolling behavioural features and post-hoc calibration enhances the robustness and interpretability of AML risk scoring without degrading discriminative performance. Short-term and dispersion-based behavioural features were shown to be especially important in highly imbalanced detection settings, while Platt scaling and isotonic regression effectively aligned predicted scores with observed outcome frequencies.

From a methodological perspective, the study contributes an integrative evaluation framework that jointly considers ranking quality, calibration, and operational effectiveness, which are often analysed separately in prior AML research. From a practical standpoint, the findings highlight the potential value of calibration-aware and behaviour-aware models for risk prioritisation in financial monitoring systems.

At the same time, the reliance on a synthetic dataset constitutes a limitation, and the reported results should be interpreted as indicative rather than directly transferable to production environments. Future work will focus on validation using real-world banking data, incorporation of temporal graph-based models, and the application of explainability techniques to further support transparent and auditable AML decision-making.

References

1. Goldbarsht D., Benson K. From later to sooner: exploring compliance with the global regime of anti-money laundering and counter-terrorist financing in the legal profession // Journal of Financial Crime. -2023.-Vol.31(4). - P.795-809. DOI 10.1108/jfc-08-2023-0201.

2. Utama P.I., Novianto W.T., Purwadi H. The role of notaries/land deed officials in combating money laundering crimes with the know your customer principle // International Journal of Educational Research & Social Sciences. -2024.-Vol.5(2). - P.279-283. DOI 10.51601/ijersc. v5i2.801.

3. Reite E., Karlsen J., Westgaard E. Improving client risk classification with machine learning to increase anti-money laundering detection efficiency // Journal of Money Laundering Control. -2025.-Vol.28(1). P.93-107.DOI 10.1108/JMLC-03-2024-0040.

4. Ali A., Abd Razak S., Othman S.H., Eisa T.A.E., Al-Dhaqm A., Nasser M., Elhassan T., Elshafie H., Saif A. Financial fraud detection based on machine learning: a systematic literature review // Applied Sciences. 2022.- Vol.12(19). - P.1-24. DOI 10.3390/app12199637.

5. Juneja S., Saurav A., Prabhakar A., Anand V., Goyal R., Thakur V. Enhancing fraud detection with gradient boosting algorithms in credit card transactions//Proc. of the 2025 Int. Conf. on Cognitive Computing in Engineering, Communications, Sciences and Biomedical Health Informatics (IC3ECSBHI). -2025.-P.1-8. DOI 10.1109/IC3ECSBHI63591.2025.10990658.

6. Lopata A., Gudas S., Butleris R., Rudžionis V., Žioba L., Veitaitė I., Dilijonas D., Grišius E., Zwitserloot M. Financial data anomaly discovery using behavioral change indicators // Electronics. - 2022. Vol.11(10). -P.1-14. DOI 10.3390/electronics11101598.

7. Weber M., Domeniconi G., Chen J., Weidele D.K.I., Bellei C., Robinson T., Leiserson C.E. Anti-money laundering in bitcoin: experimenting with graph convolutional networks for financial forensics//arXiv preprint.-2019.-P.1-7.DOI 10.48550/arXiv.1908.02591.

8. Johannessen F., Jullum M. Finding money launderers using heterogeneous graph neural networks//arXiv preprint. -2023.-P.1-20. DOI: 10.48550/arXiv.2307.13499.

9. Wan F., Li P. A novel money laundering prediction model based on a dynamic graph convolutional neural network and long short-term memory//Symmetry. -2024.-Vol.16.-P.1-22. DOI 10.3390/sym16030378.

10. Poon C.-H., Kwok J., Chow C., Choi J.-H. LineMVGNN: anti-money laundering with line-graph-assisted multi-view graph neural networks //AI. -2025.-Vol.6(4). DOI 10.3390/ai6040069.

11. IBM/AML-Data. IBM Transactions for Anti-Money Laundering (AML) Dataset [Online resource].-2019.URL:https://www.kaggle.com/datasets/ealtman2019/ibm-transactions-for-anti-money-laundering-aml.- Date of access: 10.10.2025.

12. Adelino J.M., Tierra M.C.M., Villafuerte M.Q. Development and evaluation of multi-week tropical cyclone strike probability forecasts in the Philippines // Philippine Journal of Science. -2023.-Vol.152(SI). -P.1-13.DOI 10.56899/152.s1.09.

13. Xu P., Davoine F., Zha H., Denœux T. Evidential calibration of binary SVM classifiers //Approximate Reasoning. -2016.-Vol.-72.-P.55-70. DOI 10.1016/j.ijar.2015.05.002.

14. Nguyen H.D., Fryer D. A binary-response regression model based on support vector machines // arXiv preprint. -2020. P.1-20. DOI 10.48550/arXiv.2007.11902.

15. Silva Filho T., Song H., Perello-Nieto M., Santos-Rodriguez R., Kull M., Flach P. Classifier calibration: a survey on how to assess and improve predicted class probabilities//Machine Learning. -2023.-Vol.112. P.1-50. DOI 10.1007/s10994-023-06336-7.

16. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 2016). - New York: ACM, 2016. - P.785-794. - DOI 10.1145/2939672.2939785.

17. Sahin E. K. Assessing the predictive capability of ensemble tree methods for landslide susceptibility mapping using XGBoost, gradient boosting machine, and random forest // SN Applied Sciences. - 2020. - Vol.2:1308. DOI 10.1007/s42452-020-3060-1.

18. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A. V., Gulin A. CatBoost: Unbiased boosting

with categorical features // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018). - 2018. - P.6638–6648. DOI 10.48550/arXiv.1706.09516

19. Shwartz-Ziv R., Armon A. Tabular data: Deep learning is not all you need // Information Fusion. - 2022. - Vol.81. - P.84-90. DOI 10.1016/j.inffus.2021.11.011.

20. Weber M., Domeniconi G., Chen J., Weidele D. K. I., Bellei C., Robinson T., Leiserson C. E. Anti-money laundering in Bitcoin: Experimenting with graph convolutional networks for financial forensics // arXiv preprint. - 2019.- arXiv:1908.02591. DOI 10.48550/arXiv.1908.02591.

21. Johannessen F., Jullum M. Finding money launderers using heterogeneous graph neural networks // arXiv preprint. - 2023. - arXiv:2307.13499. DOI 10.48550/arXiv.2307.13499.

22. Hamilton W., Ying Z., Leskovec J. Inductive representation learning on large graphs//arXiv preprint. -2017.- P.1-19. DOI 10.48550/arXiv.1706.02216.

23. Probst P., Wright M. N., Boulesteix A.-L. Hyperparameters and tuning strategies for random forest // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. - 2019.- Vol.9(3): e1301. DOI 10.1002/widm.1301.

24. Nyberg O., Klami A. Reliably calibrated isotonic regression // Advances in Knowledge Discovery and Data Mining: PAKDD 2021. Lecture Notes in Computer Science. - Cham: Springer. -2021.- Vol.12712. - P.578–589. DOI 10.1007/978-3-030-75762-5_46.

25. Böken B. On the appropriateness of Platt scaling in classifier calibration // Information Systems. - 2021. - Vol. 95:101641. DOI 10.1016/j.is.2020.101641

Information about the authors

Azbergen T.K. - master's student, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: azbergen.torebek@mail.ru;

Tleubayeva A. O. - doctoral student, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, e-mail: Arailym.tll@gmail.com;

Aituov A. T. - PhD, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: a.aituov@kbtu.kz;

Sabyrzhan Y. T. - master of Technical Sciences, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, e-mail: sabyrzhan.yermakhan@astanait.edu.kz.

Сведения об авторах

Азберген Т. К. - магистрант, Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан, e-mail: azbergen.torebek@mail.ru;

Тлеубаева А. О.- докторант, Astana IT University, Астана, Казахстан, e-mail: Arailym.tll@gmail.com;

Айтуов А. Т. - PhD, Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан, e-mail: a.aituov@kbtu.kz;

Сабыржан Е. Т. - магистр технических наук, Astana IT University, Астана, Казахстан, e-mail: sabyrzhan.yermakhan@astanait.edu.kz.

ҒТАМР 50.13.13 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1415**

ОНТОЛОГИЯЛЫҚ ТЕЗАУРУСТЫ ҚОЛДАНУ ӘДІСТЕМЕСІ СҰРАҚ-ЖАУАП ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ МОДУЛЬ ҚҰРУ

[1]М.Ж. Ергеш, [1]Б.Ж. Ергеш, [1]К.М. Максутова, [2]А.Д. Тулегулов

[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
[2]Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан

✉ *Корреспондент-авторлар: shymkent90@mail.ru, b.yergesh@gmail.com*

Қазақ тілі үшін цифрлық ресурстар тапшылығы жағдайында Зияткерлік бағдарламаланатын жүйелерді қолдау үшін Қазақстан тарихы мектебінің курсының пәндік білімін ресімдеу ерекше өзекті болып отыр. Бұл жұмыста 5-10 сынып оқулықтарының толық корпусы негізінде құрылған Қазақстан тарихы бойынша зияткерлік бағдарламаланатын жүйелерді зерттеу нәтижелері ұсынылады және алынған білім графигінің QA-міндеттері үшін контекст іздеудің сапасына әсері талданады.

Зерттеудің мақсаты-терминдерді теру алгоритмін әзірлеу (person, period, place, source, event, unknown). Бастапқы ”астық” белгілерін алу үшін жоғары дәлдіктегі үлгілер пайдаланылады, содан кейін оқыту логистикалық регрессияны пайдалана отырып, XLM-R трансформаторының эмбеддингтерінде жүргізіледі. Seed-белгілеу бойынша валидацияда негізгі сыныптар (person, period, place) үшін 0,89 және F1-ден 0,92-ге дейінгі дәлдікке қол жеткізіледі.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы онтологияның практикалық пайдалылығын бағалау әдісін әзірлеу болып табылады QA-661 мысалдың жиынтығы (528 пойыз /133 тест) кепілдендірілген дұрыс жауап спандарымен. Ұсынылған әдіс бірнеше семантикалық іздеу конфигурацияларын салыстырады: оқулық бөлімдері бойынша негізгі іздеу, онтологиялық ”құжаттар” бойынша іздеу және тезаурус пен онтология арқылы сұраныстар мен контексттерді кеңейту нұсқалары. Нәтижелер онтологиялық құжаттарды қолдану p@1-ді шамамен 0,56-дан 0,86-ға дейін және ndcg@10-ны ≈0,77-ден ≈0,92-ге дейін арттыратынын көрсетеді; біріктірілген ”онтология + кеңейту” схемасы ndcg-нің жоғары деңгейін және сәйкес контексттерді толық қамтуды сақтайды.

Осылайша, ұсынылған онтологиялық бағдарланған тезаурус пен Қазақстан тарихы бойынша білім графы 5–10 сыныптарға арналған оқу материалын құрылымдап қана қоймай, қазақ тіліндегі сұрақ-жауап жүйелерінде контекст іздеу сапасын айтарлықтай жақсартады және доменге бейімделген QA-модельдерді оқыту мен бағалауға арналған берік негіз қалыптастырады.

Түйін сөздер: цифрландыру, алгоритм, интеллектуалды бағдарламаланатын жүйелер, тезаурус, XLM-R, терминдерді теру, RDF/OWL, контекст іздеу.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ТЕЗАУРУСА ПОСТРОЕНИЯ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВОПРОСНО-ОТВЕТНЫХ СИСТЕМ

[1]М.Ж. Ергеш, [1]Б.Ж. Ергеш, [1]К.М. Максутова, [2]А.Д. Тулегулов

[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
[2]Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан,
e-mail: shymkent90@mail.ru, b.yergesh@gmail.com

В условиях дефицита цифровых ресурсов для казахского языка особую актуальность приобретает формализация предметных знаний школьного курса истории Казахстана для поддержки интеллектуальных программируемых систем. В данной работе представляются результаты исследования интеллектуальных программируемых систем по истории Казахстана, построенных на основе полного корпуса учебников 5-10 классов, и анализируется влияние полученного графа знаний на качество поиска контекста для QA-задач.

Цель исследования заключается в разработке алгоритма типизация терминов (person, period, place, source, event, unknown). Для получения начальных «зёрновых» меток используются высокоточные шаблоны, после чего обучение проводится на эмбеддингах трансформера XLM-R с использованием логистической регрессии. На валидации по seed-разметке достигается точность порядка 0,89 и F1 до 0,92 для основных классов (person, period, place).

Научная новизна исследования заключается в разработке метода оценки практической полезности онтологии, формируемой из QA-набор из 661 примера (528 train /133 test) с гарантированно корректными спанами ответов. В предложенном методе сравниваются несколько конфигураций семантического поиска: базовый поиск по разделам учебников, поиск по онтологическим «документам», а также варианты с расширением запросов и контекстов за счёт тезауруса и онтологии. Полученные результаты показывают, что использование онтологических документов повышает P@1 примерно с 0,56 до 0,86 и nDCG@10 с ≈0,77 до ≈0,92; комбинированная схема «онтология + расширение» сохраняет высокий уровень nDCG и почти полное покрытие релевантных контекстов.

Таким образом, предложенный нами метод не только структурируют учебный материал для 5-10 классов, но и демонстрируют существенное улучшение качества извлечения контекста в вопросно-ответных системах на казахском языке, формируя основу для последующих работ по обучению и оценке доменно-специализированных QA-моделей.

Ключевые слова: цифровизация, алгоритм, интеллектуально-программируемые системы, тезаурус, XLM-R, типизация терминов, RDF/OWL, поиск контекста.

METHODOLOGY OF APPLYING ONTOLOGICAL THESAURUS BUILDING A PROGRAM MODULE FOR QUESTION-ANSWER SYSTEMS

[1]M.Zh. Yergesh✉, [1]B.Zh. Yergesh✉, [1]K.M. Maksutova, [2]A.D. Tulegulov

[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
[2]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,
e-mail: shymkent90@mail.ru, b.yergesh@gmail.com

In the context of a shortage of digital resources for the Kazakh language, the formalization of subject knowledge from the school history course of Kazakhstan is of particular relevance to support intelligent programmable systems. This paper presents the results of a study of intelligent programmable systems on the history of Kazakhstan, built on the basis of a full corpus of textbooks for grades 5-10, and analyzes the impact of the obtained knowledge graph on the quality of context search for QA tasks.

The purpose of the study is to develop an algorithm for term typing (person, period, place, source, event, unknown). To obtain initial ”grain” labels, high-precision templates are used, after which training is carried out on XLM-R transformer embeddings using logistic regression. On validation by seed-labeling, accuracy of the order of 0.89 and F1 up to 0.92 for the main classes (person, period, place) are achieved.

The scientific novelty of the study lies in the development of a method for assessing the practical usefulness of an ontology formed from a QA set of 661 examples (528 train /133 test) with guaranteed correct answer spans. The proposed method compares several semantic search configurations: basic search across textbook sections, search across ontological ”documents,” and variants that expand queries and contexts using a thesaurus and ontology. The results show that using ontology documents increases P@1 from approximately 0.56 to 0.86 and nDCG@10 from ≈0.77 to ≈0.92; the combined ontology + expansion scheme maintains a high level of nDCG and almost complete coverage of relevant contexts.

Overall, the proposed ontology-oriented thesaurus and knowledge graph for the History of Kazakhstan not only structure the educational content for grades 5–10 but also demonstrate a substantial improvement

in context retrieval quality for Kazakh-language QA systems, forming a foundation for future research on training and evaluating domain-specialized QA models.

Keywords: digitalization, algorithm, intelligent programmable systems, thesaurus, XLM-R, term typing, RDF/OWL, and context search.

Кіріспе. Интеллектуалды білім беру жүйелерін дамыту оқу мазмұнын құрылымдалған білім түрінде ұсынуды талап етеді. Қазақ тілі үшін бұл міндет цифрлық білім беру ресурстарының, әсіресе мектеп пәндері саласында, шектеулі болуына байланысты күрделене түседі.5-10 сыныптарға арналған Қазақстан тарихы курсы тарихи оқиғалар, тұлғалар, кезеңдер мен географиялық объектілерге бай болғанымен, дәстүрлі мәтіндік форматта берілуі оны сұрақ-жауап жүйелерінде тиімді пайдалануды қиындатады [1].

Сұрақ-жауап жүйелерінің тұрақты жұмыс істеуі үшін тек мәтіндік корпус емес, пәндік ұғымдар мен олардың өзара байланыстарын қамтитын құрылымдалған модель қажет. Терминдер мен қатынастар айқындалмаған жағдайда, іздеу жолдық сәйкестікке сүйенеді, бұл қазақ тілінің морфологиялық және терминологиялық ерекшеліктері жағдайында жеткіліксіз [1]. Осыған байланысты тезаурус пен пәндік онтологияға негізделген білім графын қалыптастыру қажеттілігі туындайды.

Ұсынылған тәсіл оқу мәтіндерінің корпусы, терминологиялық қабат және онтологиялық графты біріктіруге негізделеді. Әлсіз бақыланатын машиналық оқыту әдістерін қолдану терминдерді типизациялауға және алынған білім графын сұрақ-жауап жүйесінің семантикалық іздеу контурына кіріктіруге мүмкіндік береді. Онтологиялық модельдің тиімділігі релевантты контекстіні іздеу сапасын бағалау арқылы эмпирикалық түрде айқындалады [2].

Білім беру саласының пәндік облыстары үшін онтологиялар мен тезаурустарды құрастыру мәселесі интеллектуалды оқыту жүйелері, адаптивті электрондық оқулықтар және компьютерлік оқытуды қолдау жүйелері контекстінде кеңінен зерттеледі. Онтологиялар пәндік білімді ұсынудың негізгі тетігі ретінде терминологиялық келісімділікті қамтамасыз етуге, ұғымдар арасындағы қатынастарды айқындауға және білімді әртүрлі білім беру қосымшаларында қайта пайдалануға мүмкіндік береді. Сұрақ-жауап жүйелері мен семантикалық іздеу саласындағы заманауи зерттеулерде нейрондық модельдер мен білім графтарын біріктіретін гибридті архитектураларға ерекше назар аударылады, бұл сұрауларды дәл интерпретациялауға және релевантты мәтіндік фрагменттерді тиімді таңдауға жағдай жасайды. Ресурсы шектеулі тілдер, соның ішінде түркі тілдері үшін, арнайы құрылған домендік корпустар мен онтологиялардың маңыздылығы бірқатар еңбектерде атап өтіледі [3].

Тарих пәні саласында тарихи онтологиялар мен білім графтарына арналған зерттеулер бар болғанымен, олар негізінен ірі еуропалық тілдерге бағытталған. Қазақ тілі үшін, әсіресе Қазақстан тарихының мектеп курсы аясында, жүйелі түрде сипатталған онтологиялар мен тезаурустар іс жүзінде жоқ, бұл пәндік білімді формализациялау модельдерінің және онтологиялардың сұрақ-жауап жүйелеріндегі тиімділігін бағалайтын эмпирикалық зерттеулердің тапшылығын көрсетеді.

Осы зерттеуде эмпирикалық бастапқы материал ретінде 5-10 сыныптарға арналған Қазақстан тарихы мектеп оқулықтарының толық мәтіндері пайдаланылды. Алдын ала белгілеу нәтижесінде әр секциясы оқулық, бөлім және сынып идентификаторларымен сипатталатын 208 мәтіндік секциядан тұратын бірыңғай корпус қалыптастырылды [4]. Корпус мәтіндері регистрді, бос орындарды және тыныс белгілерін нормализациялау рәсімдерінен өтіп, қазақ орфографиясының ерекшеліктеріне бейімделген токенизация негізінде өңделді [5].

Сонымен қатар оқулық мәтіндерінен автоматты түрде алынған онтологиялық триплеттер негізінде 2 973 түйін мен 2 318 қырдан тұратын бағытталған білім графы құрылды, мұнда

қатынастар негізінен хронологиялық, кеңістіктік және себеп-салдарлық сипатта беріледі [6]. Онтологияның контексті іздеу сапасына әсерін бағалау үшін Қазақстан тарихы бойынша ашық типті сұрақтар мен жауаптардан тұратын QA-датасет пайдаланылды: 889 бастапқы жазбаның ішінен жауаптың мәтіндегі орны бірмәнді анықталатын 661 мысал іріктеліп, олар оқу және тест жиынтықтарына бөлінді [7].

Нормаланған корпус пен онтологиялық триплеттер негізінде корпустық термин-кандидаттар мен бастапқы онтология терминдерін біріктіру арқылы 8 345 нормаланған терминнен тұратын пәндік тезаурус құрастырылды. Бұл тезаурус кейінгі терминдерді типизациялау және онтологиялық бағдарланған сұрақ-жауап жүйелерін құру кезеңдері үшін негізгі кіріс дерек ретінде пайдаланылды [8].

Материалдар мен әдістер. Зерттеудің эмпирикалық негізі ретінде жалпы білім беретін мектептің 5-10 сыныптарына арналған Қазақстан тарихы оқулықтарының корпусы пайдаланылды. Корпусқа «Қазақстан тарихы» сериясының ресми бекітілген алты басылымы енгізіліп, олар логикалық тұрғыдан аяқталған фрагменттерге бөлінді. Нәтижесінде корпус 208 мәтіндік секциядан тұрады: 5-сынып - 46, 6-сынып - 54, 7-сынып - 29, 8-сынып - 28, 9-сынып - 29 және 10-сынып - 22 секция. Әр секция оқулық идентификаторларымен, сынып деңгейімен, бастапқы және нормаланған мәтінмен, сондай-ақ токендер санымен сипатталады, бұл лексиканы корпус деңгейінде талдауға және терминдер мен онтологиялық фактілерді нақты мәтіндік фрагменттермен байланыстыруға мүмкіндік береді [9].

Бастапқы PDF-құжаттар алдын ала өңдеуден өтті: UTF-8 форматына түрлендіру, қызметтік элементтерді жою, регистр мен тыныс белгілерін нормализациялау және сөз тасымалдарын қалпына келтіру жүзеге асырылды. Кейін мәтіндер бос орындар мен базалық тыныс белгілері бойынша токенизацияланды.

Нормаланған корпус негізінде термин-кандидаттар іріктелді. Минималды жиілік шегіне сай келетін униграммалар қарастырылып, стоп-сөздер мен қызметтік лексиканы алып тастағаннан кейін 5 692 нормаланған токен-кандидат алынды [10]. Әр кандидат үшін нормаланған форма, жиілік бағасы, жылдық мәндерді көрсететін белгі және дерек көзі тіркелді.

Корпус пен онтология терминдерін біріктіру нәтижесінде тарихи терминдер тезаурусы қалыптастырылды. Әрбір жазба терминнің бастапқы және нормаланған формасын, жиілік бағасын, шығу көзін, термин типін және (бар болған жағдайда) нормаланған синонимдер тізімін қамтиды. Қорытынды тезаурус 8 345 бірегей нормаланған терминнен тұрады және корпус деректері мен онтологиялық құрылымдар арасындағы байланысты қамтамасыз етеді.

Онтологиялық триплеттерді шығару және интеграциялау. Әрбір оқулық үшін фактографиялық тұжырымдарды триплеттер түрінде сақтайтын жартылай автоматты түрде құрылған *ontology_triples.csv* файлы пайдаланылды. Триплеттер келесі үлгіде беріледі:

$$\langle \text{subject, relation_kk, object} \rangle ,$$

оларға қоса book_id, section_id, pages, evidence (негіздеме ретінде алынған мәтін фрагменті) және confidence (триплетті алудың сенімділік бағасы) өрістері тіркеледі.

Алты файлды біріктіру нәтижесінде көлемі 2318 триплеттен тұратын «біріздендірілген онтология» алынды. Осы триплеттер негізінде $G = (V, E)$, түріндегі бағытталған білім графы құрылған, мұнда төбелер жиыны

$$V = \{v : v = \text{subject} \vee v = \text{object}\}$$

2973 бірегей мәндіден (сущность) тұрады, ал қырлар жиыны

$$E = \{(v_i, r, v_j)\},$$

олардың арасындағы қатынастармен таңбаланған доғаларды сипаттайды.

Графтың статистикалық талдауы орташа дәреженің шамамен 1.56, ал максималды дәреженің 27-ге тең екенін көрсетті; визуализация үшін

ең жоғары байланыстылығы бар түйіндердің локалды подграфтары да, дәрежесі екіден кем емес түйіндерден тұратын подграф та пайдаланылды. Триплеттердің оқулықтар бойынша бөлінісі (бір кітапқа 94-тен 776-ға дейін) онтологияның оқу материалын қаншалықты қамтитынын талдау және болашақ эксперименттердегі ықтимал стратификация (қабаттарға бөлу) үшін жеке сақталады.

Онтология екі түрлі түрде сақталады: кестелік ұсынылым (DataFrame) ретінде және графтық құрылым (бағытталған мультиграф) ретінде. Бұл онтологияны бір мезгілде қосымша құжаттар (анықтамалар мен түсіндірмелер) көзі ретінде де, сұрауларды семантикалық кеңейтуге негіз болатын білім графы ретінде де пайдалануға мүмкіндік береді.

Трансформерлерді пайдалана отырып терминдерді әлсіз бақыланатын типизациялау. Терминдерді ықшам пәндік сыныптар жүйесіне келтіру үшін әлсіз бақыланатын оқытудың екі кезеңді сұлбасы іске асырылды:

1. эвристикаға негізделген seed-таңбаларды тағайындау,

2. трансформерлік ұсынуларға сүйенген көпсыныпты классификация.

Бірінші кезеңде әрбір терминге τ домендік эвристикалар негізінде анықталатын «тұқымдық» (seed) таңба

$$y^{seed}(\tau) \in \{person, period, place, event, source, unknown\}$$

сәйкестендірілді. Бұл үшін персоналияларға, топонимдерге, тарихи кезеңдерге және дереккөздерге тән индикаторлық жұрнақтар мен лексемалар тізімдері, сондай-ақ жылдар мен жылдық интервалдарды анықтайтын үлгілер (регулярлы өрнектер) пайдаланылды.

Алынған seed-жиын айқын теңгерімсіз болды: 8345 терминнің ішінен сенімді таңба 860 терминге ғана берілді (оның ішінде 411 - «person», 363 - «period», 86 - «place», ал «event» және «source» сыныптары үшін тек жекелеген жағдайлар тіркелді); қалған терминдер «unknown» сыныбына жатқызылды. Машиналық оқыту моделін оқыту үшін ең көп толтырылған үш сынып: *person, period* және *place* қана пайдаланылды.

Екінші кезеңде терминдер көптілді *xlm-roberta-base* трансформерлік моделінің көмегімен векторлық кеңістікке бейнеленді. Әрбір термин үшін

$$h_\tau \in \mathbb{R}^{768},$$

өлшемді векторлық ұсыну есептелді; ол модельдің соңғы жасырын қабатындағы [CLS] токенінің эмбеддигі ретінде алынды.

Осы эмбеддингтер негізінде көпсыныпты логистикалық регрессия моделі келесі ықтималдық функциясымен оқытылды:

$$p(y = c \mid h_\tau) = \frac{\exp(w_c^\top h_\tau + b_c)}{\sum_{c' \in C} \exp(w_{c'}^\top h_\tau + b_{c'})},$$

Мұнда $C = \{$"person", "period", "place"$\}$, ал параметрлер жиыны $\{w_c, b_c\}$seed-таңбалар бойынша кросс-энтропия шығынын минимизациялау арқылы бағаланды:

$$L = -\sum_{\tau \in T_{\text{seed}}} \log p(y^{\text{seed}}(\tau) \mid h_\tau).$$

Модельдің орнықтылығын бағалау үшін таңдаманы (выборка) 80/20 қағидаты бойынша қабатталған бөліну (стратификация) арқылы оқыту және валидация жиынтықтарына бөлдік. Валидация жиынтығында дәлдік (accuracy) шамамен 0.89, ал макро-F1 шамамен 0.84 деңгейінде болды, бұл трансформерлік ұсынулардың seed-эвристикалармен жеткілікті дәрежеде келісімді екенін көрсетеді.

Трансформер негізіндегі модель шығарған нәтижелік сыныптық болжам

$$y^{\text{ML}}(\tau)$$

seed-таңбамен жоғары дәлдік қағидасы бойынша біріктірілді:

$$y(\tau) = \begin{cases} y^{\text{seed}}(\tau), & \text{егер } y^{\text{seed}}(\tau) \neq \text{unknown}, \\ y^{\text{ML}}(\tau), & \text{онда.} \end{cases}$$

Осы гибридті сұлбаның нәтижесінде терминдердің пәндік сыныптар бойынша таралуы төмендегідей болды:

- 1158 термин - «person»,
- 585 термин - «period»,
- 238 термин - «place»,
- 35 термин - «source»,
- 14 термин - «event»,
- 6315 термин - «unknown».

Алынған сыныптық таңбалар әрі қарай пәндік білім графының құрылымын талдауда, сондайақ сұрауларды мақсатты түрде семантикалық кеңейтуде (әсіресе персоналиялар мен тарихи кезеңдерді басымдықпен қосу кезінде) қолданылды.

Сұрақ-жауап жүйесі үшін контекстіні іздеу моделі. Онтология мен тезаурустың релевантты контекстіні іздеуге әсерін бағалау үшін арнайы QA-жиынтық құрылды. Бастапқы 889 аннотацияланған жазбаның ішінен оқулық фрагменттері мен мәтіндік дәлелдермен байланыстырылған 661 сұрақ іріктеліп, олар 528 оқыту және 133 тест мысалына бөлінді.

Контекстіні іздеу әрбір сұрақ үшін құжаттарды (оқулық секциялары мен онтологиялық анықтамаларды) ранжирлеу міндеті ретінде қарастырылды. Берілген кандидаттар жиыны үшін базалық модель сұрақ пен құжат арасындағы мәтіндік ұқсастыққа (косинустық ұқсастық немесе Okapi BM25) негізделген ранжирленген тізім құрады.

Экспериментте төрт конфигурация қолданылды. Plain нұсқасында индексе тек оқулық мәтіндері енгізіліп, сұрау ретінде сұрақ мәтіні ғана пайдаланылды. OntologyDocs конфигурациясында индексе онтологиялық evidence және subject–relation–object өрістерінен алынған анықтамалық құжаттар қосылды. Plain+Expansion нұсқасында индекс өзгеріссіз қалып, сұраулар тезаурус негізінде семантикалық түрде кеңейтілді. OntologyDocs+Expansion конфигурациясы кеңейтілген индекстеу мен сұрауларды онтология және тезаурус арқылы кеңейтуді бір мезгілде іске асырады.

Ранжирлеу сапасы ақпараттық іздеу саласындағы стандартты метрикалар бойынша бағаланды: алғашқы k құжат бойынша дәлдік $P@k$, толықтық $P@k$ және нормаланған дисконтталған жинақталған пайдалық DCG $nDCG@k$. Бинарлық релеванттік жағдайында (құжатта жауаптың дұрыс фрагменті бар/жоқ) жекелеген сұрақ qүшін, ранжирлеу π_qберілген кезде метрикалар келесідей анықталды:

$$P@k(q) = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} rel(\pi_q(i)), \quad R@k(q) = \frac{1}{|\,R_q\,|}\sum_{i=1}^{k} rel(\pi_q(i)),$$

мұнда $\text{rel}(d) \in \{0,1\}$- құжат dүшін релеванттілік индикаторы, ал R_q- сұрақ q үшін барлық релевантты құжаттар жиыны.

DCG метрикасы k нүктесіндегі шектеуде келесі формула бойынша есептелді:

$$DCG@k(q) = \sum_{i=1}^{k} \frac{2^{rel(\pi_q(i))} - 1}{\log_2(i+1)},$$

ал нормаланған нұсқасы:

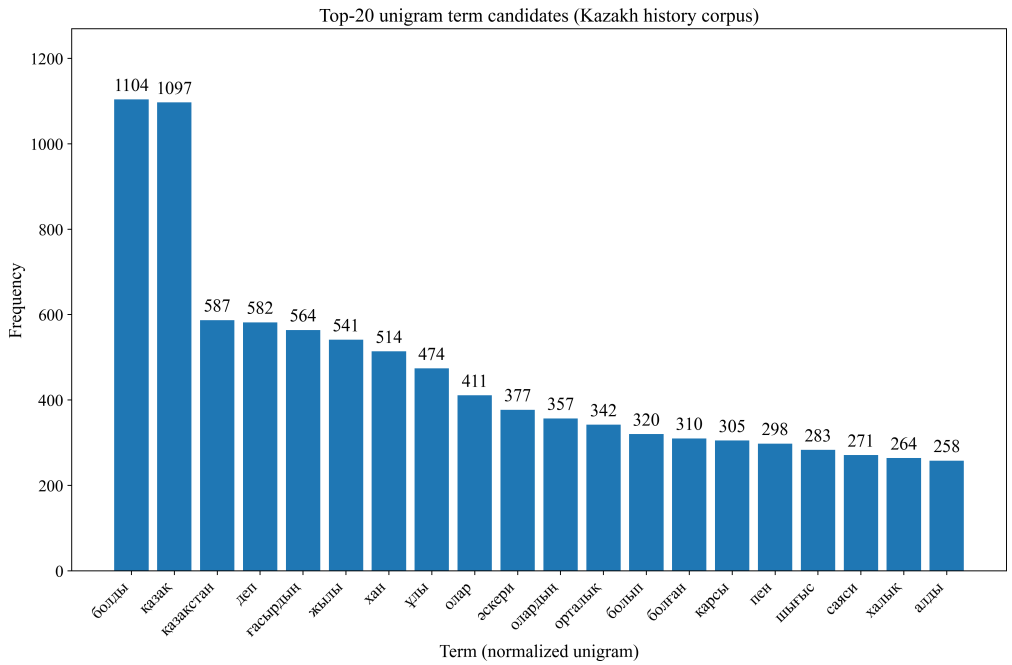
$$nDCG@k(q) = \frac{DCG@k(q)}{IDCG@k(q)},$$

мұнда $IDCG@k(q)$- идеал ранжирлеу жағдайындағы DCG-дің ең жоғарғы мүмкін мәні (яғни, релевантты құжаттардың барлығы тізімнің басында тұрғандағы мән).

Жүйе үшін финалдық метрика мәндері тест жиынтығындағы барлық сұрақтар бойынша усреднение (орташа мәнін алу) арқылы есептелді.

Нәтижелер мен талқылау. Корпус пен лексиканың сипаттамалары. Қазақстан тарихы бойынша 5-10 сыныптарға арналған мектеп оқулықтары негізінде қалыптастырылған корпус 208 мәтіндік секциядан тұрады және оқу бағдарламасының негізгі тақырыптық бағыттарын бірқалыпты қамтиды. Секциялар көлемі қысқа кіріспе фрагменттерден бастап мыңнан астам токені бар ірі параграфтарға дейін ауытқиды, бұл контекст іздеу эксперименттері үшін реалистік жағдайды қамтамасыз етеді [11].

1-суретте 5-10 сынып оқулықтарының 208 секциясынан алынған ең жиі кездесетін 20 нормаланған униграмманың жиілік үлестірімі көрсетілген. Ең жоғары жиіліктер жалпы қолданыстағы және тарихи дискурсқа тән лексемаларға тиесілі. Үлестірім айқын оң жақты асимметриямен сипатталады: жоғары жиілікті токендердің аз бөлігі жалпы кездесулердің елеулі үлесін құрайды, ал төмен жиілікті бірліктер үлестірімнің «құйрығын» қалыптастырады.



1-сурет. Қазақстан тарихы- мектеп оқулықтары корпусындағы термин-кандидаттардың ТОП-20 униграммасы

Бұл нәтиже терминологиялық кандидаттарды кейінгі кезеңде қосымша сүзгіден өткізудің қажеттілігін көрсетеді, өйткені тек жиілікке негізделген іріктеу бір жағынан әлеуетті маңызды тарихи ұғымдарды, екінші жағынан пәндік термин болып табылмайтын жалпы қолданыстағы грамматикалық және қызметтік бірліктерді қатар қамтиды [12] .

1-кесте онтологиялық бағдарланған тезаурус элементтерін ұсыну форматын иллюстрациялайды: әрбір термин үшін оның бастапқы мәтіндік формасы, нормаланған жазылуы, корпустағы бағаланған жиілігі, дереккөзі (корпус немесе онтология) және бірлік типі (бірсөзді немесе көпсөзді термин) көрсетіледі.

Келтірілген фрагмент ресурстың хронологиялық кезеңдерді, антропонимдер мен топонимдерді, сондай-ақ абстрактілі тарихи ұғымдарды қамтитынын көрсетеді, бұл білім графын құру және сұрақ-жауап жүйелерін қолдау үшін маңызды.

«Қазақстан тарихы» пәндік облысы терминдерін типизациялау үшін эвристикалық ережелер мен терминдердің үлестірілген векторлық ұсынуларына негізделген қадағаланатын оқытуды біріктіретін әлсіз бақыланатын гибридті сұл-

ба қолданылды. Бұл тәсіл тек шаблондық ережелерге сүйенуден бас тартып, контексті ескеретін, жалпылай алатын және белгісіздік деңгейін басқаратын модель арқылы тезаурус терминдерінің негізгі бөлігін автоматты түрде типизациялауға мүмкіндік береді [13].

Эвристикалық seed-таңбалар. Бірінші қадамда әрбір нормаланған термин $\tilde{t}_i$үшін ережеге негізделген функция қолданылды:

$$s(\tilde{t}_i) \in \{\text{”event”}, \text{”place”}, \text{”period”}, \text{”source”}, \text{”person”}, \text{”unknown”}\},$$

1-кесте. Қазақстан тарихы мектеп курсының тезаурусынан фрагмент (терминдер және олардың нормаланған формаларының үлгілері)

№	**Term**	**term_norm**	**freq_est**	**source**	**term_type**
1	1953–1964 жылдар	1953-1964 жылдар	81	ontology	multiword
2	Әйелдер	Әйелдер	19	ontology	single
3	б.з.д. 3 мыңжылдық	б з д 3 мыңжылдық	11	ontology	multiword
4	арал теңізі жанынан	арал теңізі жанынан	58	ontology	multiword
5	мәдениеттің өркендеу кезеңі	мәдениеттің өркендеу кезеңі	32	ontology	multiword
6	сырдария бойы қалалары	сырдария бойы қалалары	267	ontology	multiword
7	жеке тұлғаларға	жеке тұлғаларға	78	ontology	multiword
8	Найза	Найза	16	ontology	single
9	зияд ибн салих	зияд ибн салих	27	ontology	multiword
10	Уақыт	Уақыт	78	ontology	single
11	кіші обалардағы мәйіттер	кіші обалардағы мәйіттер	45	ontology	multiword
12	сопақша ойықтар	сопақша ойықтар	0	ontology	multiword
13	еуропалықтардың қыпшақ тілі үйренуі	еуропалықтардың қыпшақ тілі үйренуі	194	ontology	multiword
14	даяң хан	даяң хан	514	ontology	multiword
15	қаратау жотасы	қаратау жотасы	13	ontology	multiword
16	қимақ тайпасының басшысы	қимақ тайпасының басшысы	122	ontology	multiword
17	қалалық мәдениеттің қалыптасуы	қалалық мәдениеттің қалыптасуы	113	ontology	multiword

яғни терминге «оқиға» (event), «орын» (place), «кезең» (period), «дереккөз» (source), «тұлға» (person) немесе «белгісіз» (unknown) сыныптық таңбаларының бірі беріледі.

Бұл функция қазақ және орыс тілдеріндегі суффикстер мен негізгі сөздерге (хан, би, сұлтан, қаласы, ғасыр, жылдары және т.б.) негізделген эвристикалық «көрсеткіштерді», сондай-ақ жылдық интервалдарды анықтайтын детекторды пайдаланады [14].

Жалпы тезауруста 8345 бірегей нормаланған термин бар. Seed-таңбалардың терминдер бойынша таралуы 2-кестеде келтірілген.

2-кесте. Тезаурустағы эвристикалық seed-таңбалардың таралуы

Класс	Терминдер саны	8345-тен үлесі, %
Unknown	7436	89,1
Person	411	4,9
Period	363	4,3
Place	86	1,0
Source	35	0,4
Event	14	0,2

3-кесте. Сыныптар бойынша оқыту жиынтығының көлемі (seed-таңбалар бойынша белгілеу)

Класс	Seed-үлгілер саны	860 ішіндегі үлесі, %
Person	411	47,8
Period	363	42,2
Place	86	10,0

Кесте деректері қарапайым ережелердің тұлғалар, тарихи кезеңдер және географиялық объектілердің шектеулі бөлігін ғана жоғары дәлдікпен айқындайтынын, ал терминдердің басым бөлігі «unknown» санатында қалатынын көрсетеді. Бұл машиналық оқыту модельдерін қолдану қажеттілігін айқын дәлелдейді.

Векторлық термин ұсынулары. Екінші қадамда әрбір термин t_iкөптілді XLM-RoBERTa трансформерлік моделі көмегімен бекітілген өлшемді векторға кодталды:

$$h_i = f_\theta(t_i) \in \mathbb{R}^{768},$$

мұнда $f_\theta(\cdot)$- параметрлері θболатын XLM-R моделі, ал h_iвекторы модельдің соңғы жасырын қабатындағы [CLS] токенінің ұсынуынан алынады. Осылайша 8345 терминнің барлығы үшін эмбеддингтер матрицасы құрылды:

$$H \in \mathbb{R}^{8345\times768}.$$

Классификаторды seed-деректерде оқыту. Қадағаланатын оқыту (обучение с учителем) үшін тек жақсы ұсынылған (жеткілікті көлемдегі) seed-таңбалар пайдаланылды. Бұл мақсатта машиналық оқыту классификаторы келесі сыныптар жиыны үшін оқытылды:

$$C_{\text{ML}} = \{\text{”person”}, \text{”period”}, \text{”place”}\}.$$

event және source сыныптарына жатқызылған терминдер санының аздығына (тиісінше 14 және 35 бірлік) байланысты олар оқу жиынтығына енгізілмеді және кейінгі кезеңдерде тек ереже-негізді (rule-based) тәсілдер арқылы өңделді [15].

Нәтижесінде қадағаланатын оқыту үшін пайдаланылған терминдер саны 860 бірлікті құрады (3-кесте).

Осы деректер негізінде көпсыныпты логистикалық классификатор оқытылды:

$$p(c \mid h_i) = \text{softmax}(W h_i + b), c \in C_{\text{ML}},$$

мұнда $W \in \mathbb{R}^{|\mathscr{C}_{\text{ML}}|\times768}$, $b \in \mathbb{R}^{|\mathscr{C}_{\text{ML}}|}$.

Параметрлер (W, b) стандартты кросс-энтропиялық шығын функциясын минимизациялау арқылы бағаланды:

$$L = -\sum_{i \in S} \log p(s(\tilde{t}_i) \mid h_i),$$

мұнда S- C_{ML}сыныптарына жататын seed-таңбамен белгіленген терминдердің индекстер жиыны.

Сыныптар арасындағы дисбаланста өтеу үшін логистикалық регрессияда сыныптар бойынша салмақталған тәсіл *(class_weight = ”balanced”)* қолданылды, ал модель сапасы стратификацияланған бөлу арқылы алынған валидациялық ішкі жиынтықта (seed-деректердің 20 %-ы) бағаланды.

4-кесте. ML-классификатордың seed-валидациядағы сапасы

Класс	Precision	Recall	F1-score	Support
Period	0,984	0,863	0,920	73
Person	0,915	0,915	0,915	82
Place	0,577	0,882	0,698	17

Валидация жиынтығында жалпы дәлдік 0,890 (172 мысал), макроорташа $F_1 = 0,844$, ал салмақталған $F_1 = 0,895$болды. Бұл, салыстырмалы түрде seed-үлгілер саны аз болғанына қарамастан, модельдің тұлғалар (person) мен тарихи кезеңдерді (period) жақсы ажырата алатынын көрсетеді. place сыныбы бойынша дәлдік етілгендей төмендеу, себебі мысалдар ең аз дәл осы класта шоғырланған, дегенмен толықтық (recall) мәні жоғары деңгейде сақталады.

Гибридті түрде бүкіл тезаурусқа сыныптық таңба беру. Келесі қадамда оқытылған классификатор бастапқыда seed-таңбасы unknown болған терминдерді қоса алғанда, тезаурустағы барлық терминдерге қолданылды. Әрбір термин үшін ықтималдықтардың үлестірімі $p(c \mid h_i)$есептеліп, одан кейін сенім шегі $\tau = 0,6$қолданылды. Соған сәйкес аралық сыныптық болжам $\hat{c}_i$мына ережемен анықталды:

$$\hat{c}_i = \begin{cases} \text{argmax}_{c \in C_{ML}} p(c \mid h_i), & \text{егер } \max_c p(c \mid h_i) \geq \tau, \\ \text{”unknown”}, & \text{әйтпесе.} \end{cases}$$

Осыдан кейін термин үшін қорытынды сыныптық таңба y_iкелесі гибридті қағида бойынша тағайындалды:

$$y_i = \begin{cases} s(\tilde{t}_i), & \text{егер } s(\tilde{t}_i) \in \{event, source\}, \\ s(\tilde{t}_i), & \text{егер } s(\tilde{t}_i) \neq unknown, \\ \hat{c}_i, & \text{егер } s(\tilde{t}_i) = unknown. \end{cases}$$

Яғни, сирек, бірақ маңыздылығы жоғары event және source сыныптары үшін эвристикалық таңбалар әрқашан сақталады; ал person, period және place сияқты массалық сыныптарда ML-модель бастапқыда белгісіз (unknown) күйінде қалған терминдердің едәуір бөлігін қосымша типизациялайды [16].

Тезаурус бойынша сыныптардың гибридті өңдеуден кейінгі қорытынды үлестірімі 5-кестеде келтірілген.

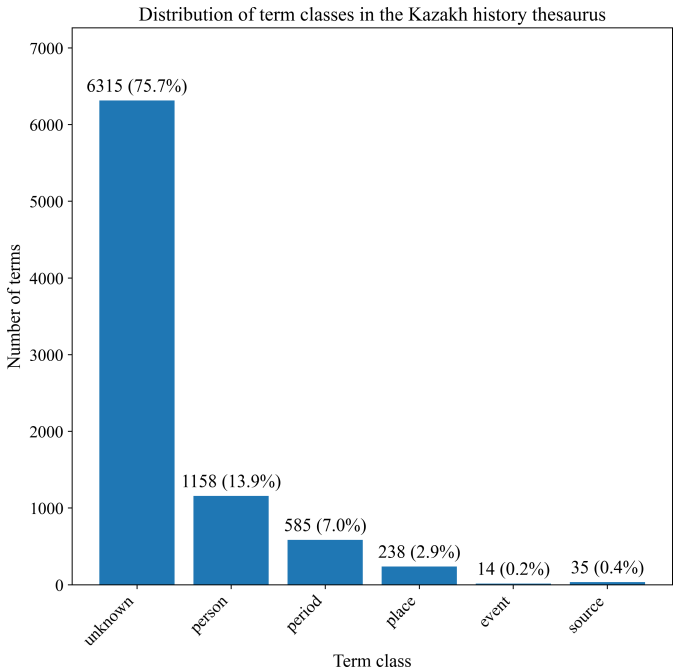
Бастапқы эвристикалық белгілеумен салыстырғанда, типі анықталмаған терминдердің үлесі 89,1 %-дан 75,7 %-ға дейін төмендеп, тұлғалар, тарихи кезеңдер және географиялық объектілер саны екі еседен артық артты. Сирек кездесетін «оқиға» және «дереккөз» сыныптары үшін seed-таңбалар сақталып, онтологиялық графты құру кезеңіне толық енгізілді.

5-кесте. Терминдер сыныптарының қорытынды үлестірімі (гибридті схема)

Класс	Терминдер саны	8345-тен үлесі, %
Unknown	6315	75,7
Person	1158	13,9
Period	585	7,0
Place	238	2,9
Event	14	0,2
Source	35	0,4

Нәтижесінде 8 345 терминнен тұратын типтелген тезаурус қалыптастырылды, оның құрамына 1 158 тарихи тұлға, 585 кезең, 238 топоним, сондай-ақ жекелеген оқиғалар мен дереккөздер кіреді. Бұл типизация онтологиялық триплеттерді генерациялау, білім графын құру және сұрақ-жауап жүйелерінде контекст іздеу сапасын арттыру үшін негізгі тірек компонент болып табылады.

2-суретте терминдердің алты сынып бойынша үлестірімі көрсетілген: person (13,9 %), period (7,0 %), place (2,9 %), event (0,2 %), source (0,4 %) және басым үлеске ие unknown (75,7 %). unknown сыныбының жоғары үлесі қателіктен емес, әлсіз бақыланатын белгілеу кезінде қабылданған әдістемелік жорамалдардың салдары болып табылады.



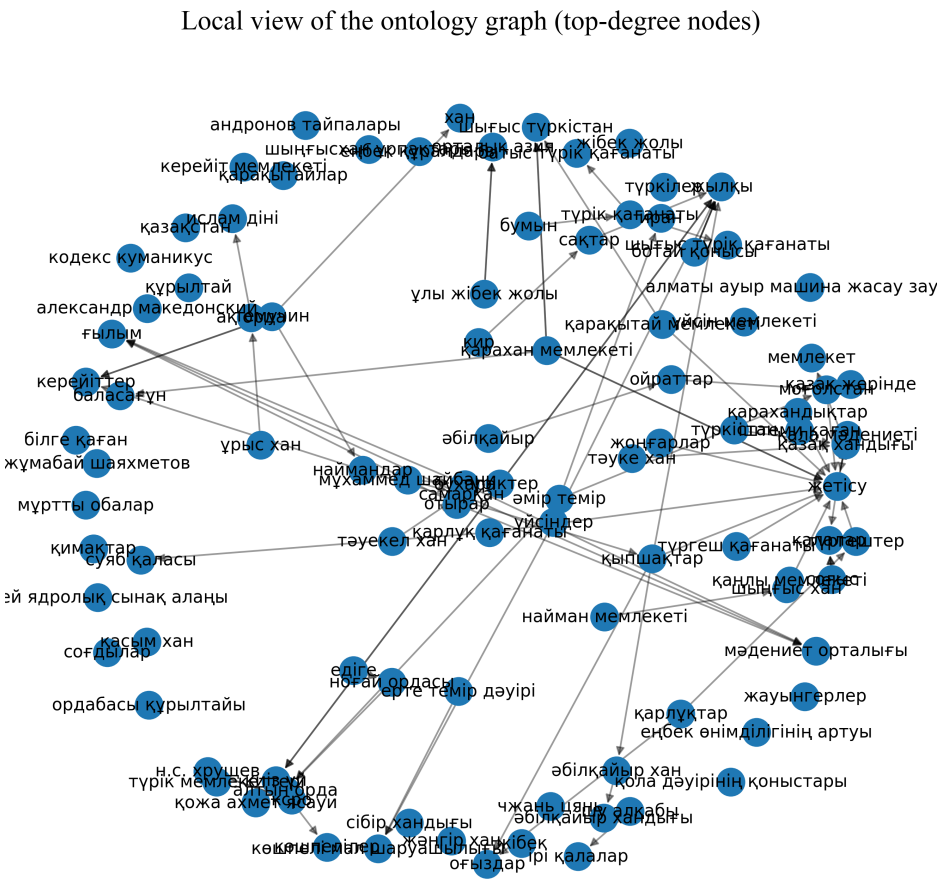
2-сурет. Қазақстан тарихы (5–10 сыныптар) бойынша онтологиялық бағдарланған тезаурустағы термин сыныптарының үлестірімі

Біріншіден, эвристикалық ережелер тек жоғары дәлдіктегі бастапқы «seed» таңбаларды қалыптастыру үшін қолданылып, морфологиялық және лексикалық үлгілердің шектеулі жиынын қамтыды. Екіншіден, логистикалық регрессия тек person, period және place сыныптары бойын-

ша оқытылып, модель нәтижелері ықтималдығы p ≥ 0,6 болған жағдайда ғана қабылданды, ал сенімділігі төмен жағдайлар әдейі unknown санатында қалдырылды. Үшіншіден, семантикалық тұрғыдан маңызды, бірақ сирек кездесетін event және source сыныптары тек қатаң эвристикалық ережелер арқылы белгіленіп, модель арқылы жасанды толықтыру жүргізілген жоқ.

Нәтижесінде unknown санатына жалпы қолданыстағы лексемалармен қатар, ағымдағы кезеңде сенімді типизациялау белгілері жеткіліксіз терминдер де жинақталды. Бұл айқын белгіленген сыныптар үшін жоғары дәлдікті қамтамасыз етіп, онтологиялық графты құру барысында қателік тәуекелін төмендетеді және кейінгі қосымша белгілеу үшін әдістемелік тұрғыдан үйлесімді кеңістік қалдырады.

3-суретте 2 973 түйін мен 2 318 бағытталған қырдан тұратын онтологиялық графтың локалды проекциясы көрсетілген. Визуализацияда дәрежесі ең жоғары 100 түйін таңдалып, Қазақстан тарихының мектеп курсына арналған пәндік графтың құрылымдық «өзегін» айқындауға мүмкіндік береді. Түйіндер тезаурус терминдеріне, ал қырлар оқулық мәтіндерінен алынған типтелген семантикалық қатынастарға сәйкес келеді [17].



3-сурет. Қазақстан тарихы бойынша онтологиялық графтың локалды фрагменті (байланыстылығы ең жоғары түйіндер)

Жүйеде unknown сыныбына жататын терминдердің салыстырмалы түрде көп болуы қате немесе әдістемелік қайшылық болып саналмайды. Бұл категорияға саналы түрде екі топ енгізілді: (1) person, period, place, event және source сияқты нысаналы онтологиялық рөлдердің ешқайсысына жатпайтын, мазмұны жағынан жалпы немесе абстрактілі ұғымдарды білдіретін тер-

миндер; (2) трансформерлік модель белгілі бір сыныпқа жатқызу ықтималдығын сенім шегінен төмен (p <0,6) деп бағалаған терминдер. Осылайша, unknown техникалық класс ретінде «өзге домендік концепттер» жиынын білдіреді және мәнді сыныптар үшін типизацияның жоғары дәлдігін сақтауға, күмәнді таңбаларды жасанды түрде тағайындаудан бас тартуға, сондай-ақ онтологиялық графты құрудың әдістемелік корректілігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Бағалау әдістемесі. Екі құжат коллекциясы үшін де (plain-контекст және онтологиялық тұрғыдан байытылған контекст) классикалық BM25 ранжирлеушісі қолданылды. Бағалау 5-10 сыныптарға арналған Қазақстан тарихы оқулықтары негізінде қалыптастырылған 133 «сұрақ–контекст» жұбынан тұратын тест жиынтығында жүргізілді. Әрбір сұрақ үшін жалғыз релевантты құжат ретінде сол сұраққа бастапқыда аннотацияланған сәйкес оқулық фрагменті алынды. BM25 релеванттық функциясы стандартты түрде мына түрде берілді:

$$\mathrm{BM25}(q,d)=\sum_{t\in q}\mathrm{IDF}(t)\,\frac{f(t,d)\,(k_1+1)}{f(t,d)+k_1\left(1-b+b\frac{|d|}{|\bar{d}|}\right)},$$

мұнда $f(t,d)$- dқұжатындағы tтерминының жиілігі, $|\ d\ |$- құжаттың ұзындығы, $|\,\bar{d}\,|$- коллекциядағы құжаттардың орташа ұзындығы, ал гиперпараметрлер $k_1 = 1,5$және $b = 0,75$мәндерінде бекітілді.

Жүйенің сапасы Precision@k, Recall@k және nDCG@k метрикалары бойынша өлшенді. Әр сұрауға бір ғана релевантты құжат сәйкес келгендіктен, q_iсұрағы үшін метрикалар мына түрде есептелді:

$$P@k(q_i)=\frac{1[\mathrm{rank}_i\le k]}{k},\ R@k(q_i)=1[\mathrm{rank}_i\le k],\ nDCG@k(q_i)=\frac{1/\log_2(\mathrm{rank}_i+1)}{1},$$

мұнда rank_i- релевантты құжаттың ранжирленген тізімдегі позициясы, $1[\cdot]$- индикатор-функция (шарт орындалса 1, орындалмаса 0). Әр метриканың қорытынды мәні барлық сұрақтар бойынша арифметикалық орта ретінде есептелді.

Салыстыру үшін төрт конфигурация қарастырылды: Plain - онтологиялық префикссіз және сұрауларды кеңейтусіз тек бастапқы оқулық мәтіндеріне негізделген нұсқа; OntologyDocs - құжаттар онтологиялық анықтамалармен (onto-defs префиксі) толықтырылған конфигурация; Plain+Expansion - құжаттар өзгеріссіз қалып, сұраулар тезаурус синонимдері мен онтологиялық графтағы көрші терминдер есебінен семантикалық түрде кеңейтілген нұсқа; OntologyDocs+Expansion – онтологиялық тұрғыдан байытылған құжаттар мен сұрауларды кеңейту бір уақытта қолданылатын конфигурация. Жиынтық нәтижелер 6-кестеде келтірілген, онда барлық конфигурациялар үшін негізгі метрикалардың (P@1, P@5 және nDCG@10) орташа мәндері көрсетіліп, әрбір бағандағы ең жоғары көрсеткіштер ерекшеленіп белгіленген [18].

Талдау және интерпретация. Кесте 6 деректері онтологиялық тұрғыдан байытылған құжаттық ұсынылымның (*OntologyDocs*) негізгі метрикалардың басым бөлігі бойынша ең жоғары нәтижелер беретінін көрсетеді. Базалық *Plain* конфигурациясымен салыстырғанда, құжат контекстіне онтологиялық анықтамаларды қосу P@1 көрсеткішін 0,556-дан 0,857-ге дейін арттырып, nDCG@10 мәнін 0,774-тен 0,925-ке дейін жақсартты, бұл релевантты фрагменттердің ранжирлеу тізімінің жоғарғы бөлігінде неғұрлым дәл орналасқанын білдіреді.

OntologyDocs+Expansion конфигурациясы ранжирлеу сапасы бойынша екінші нәтиже көрсетіп (nDCG@10 = 0,873), R@10 метрикасы бойынша ең жоғары толықтыққа (0,992) жетеді, яғни релевантты контекст дерлік барлық жағдайда алғашқы он нәтиженің ішінде бола-

ды. Ал тек сұрауларды кеңейтуге негізделген *Plain+Expansion* нұсқасы базалық модельмен салыстырғанда сапаның төмендеуіне алып келеді, бұл онтологиялық құрылымсыз агрессивті кеңейтудің сұрау мәтініндегі шуды арттыруымен түсіндіріледі.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер зерттеудің негізгі гипотезасын растайды: Қазақстан тарихы бойынша онтологиялық ұйымдастырылған білім графын мәтіндік индекс құрамына енгізу қазақ тіліндегі сұрақ-жауап жүйелерінде релевантты контекстіні алу тиімділігін айтарлықтай арттырады. Сұрауларды кеңейту оң әсерді тек онтологиялық тұрғыдан байытылған құжаттармен бірге қолданылған жағдайда ғана береді [19].

6-кесте. Индекс пен сұраудың әртүрлі конфигурациялары үшін контексті алу сапасы

Конфигурация	P@1	P@5	nDCG@10
Plain	0.556	0.180	0.774
OntologyDocs	**0.857**	**0.195**	**0.925**
Plain+Expansion	0.444	0.176	0.705
OntologyDocs+Expansion	0.752	0.191	0.873

7-кесте. BM25-тің төрт конфигурациясы үшін контексті алу сапасын салыстыру (тест жиынтығы, n = 133)

Метрика	Plain	OntologyDocs	Plain+Expansion	OntologyDocs+Expansion
P@1	0.556	0.857	0.444	0.752
R@1	0.556	0.857	0.444	0.752
nDCG@1	0.556	0.857	0.444	0.752
P@3	0.278	0.318	0.258	0.291
R@3	0.835	0.955	0.774	0.872

7-кестеде Қазақстан тарихы бойынша QA-жиынтығы үшін контексті алу сапасын бағалау нәтижелері келтірілген. Тек оқулық мәтіндеріне негізделген Plain конфигурациясы орташа көрсеткіштер береді (P@1 = 0,556; nDCG@10 = 0,774). Онтологиялық тұрғыдан байытылған құжаттарды қосу (OntologyDocs) барлық метрикалардың жүйелі түрде өсуіне алып келеді: бірінші позициядағы дәлдік 0,857-ге дейін, ал nDCG@10 мәні 0,925-ке дейін артады. Бұл онтологиялық анықтамаларды контекстке енгізу релевантты фрагменттің ранжирлеу тізімінің жоғарғы бөлігінде орналасу ықтималдығын едәуір арттыратынын көрсетеді.

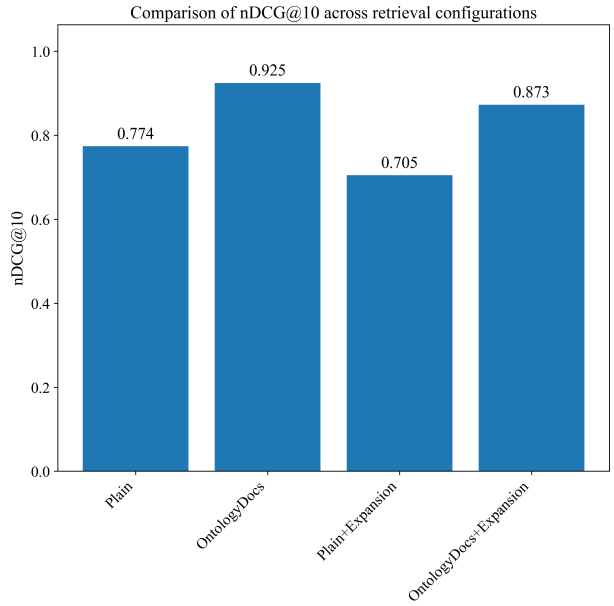
Керісінше, құрылымданған онтологиялық префикссіз тек сұрауларды кеңейтуге негізделген Plain + Expansion конфигурациясы Plain нұсқасымен салыстырғанда сапаның төмендеуіне әкеледі. Бұл эффект сұраудың шамадан тыс кеңейтілуімен және семантикалық құрылыммен қолдау таппаған лексикалық шудың артуымен түсіндіріледі.

Комбинацияланған OntologyDocs+Expansion тәсілі компромисс нәтижені көрсетеді: ол көптеген метрикалар бойынша OntologyDocs конфигурациясынан төмен болғанымен, R@10 = 0,992 және P@10 = 0,099 мәндері бойынша ең жоғары толықтықты қамтамасыз етеді. Бұл релевантты құжаттың дерлік барлық жағдайда топ-10 нәтижелер ішінде табылатынын және сұра-

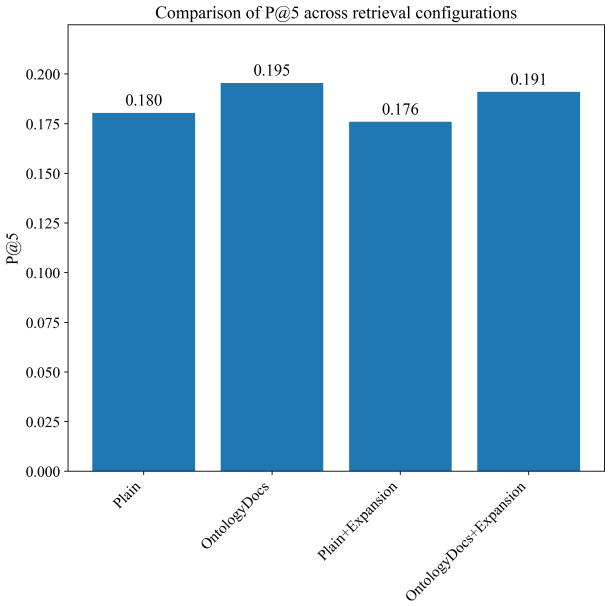
уды кеңейту механизмдерінің ранжирлеудің үлкен тереңдіктерінде қосымша пайда беретінін білдіреді.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер сапаны арттырудың негізгі факторы құжаттарды онтологиялық тұрғыдан байыту екенін, ал сұрауларды кеңейтуді онтологиялық құрылымданған индекспен бірге қолдану орынды екенін растайды [20].

4-суретте іздеу модулінің төрт конфигурациясы үшін nDCG@10 мәндерінің салыстырмалы диаграммасы көрсетілген.



4-сурет - Контексті алу конфигурациялары үшін ранжирлеу сапасын (nDCG@10) салыстыру



5-сурет - Қазақстан тарихы мектеп корпусы бойынша әртүрлі іздеу конфигурациялары үшін P@5 дәлдігін салыстыру

Онтологиялық құжаттарды пайдаланатын OntologyDocs конфигурациясы ранжирлеудің ең жоғары сапасын көрсетеді (nDCG@10 = 0,925), бұл оқу материалын құрылымдауда айқын ұйымдастырылған білім графының тиімділігін дәлелдейді. Базалық Plain нұсқасының көрсеткіші төменірек (nDCG@10 = 0,774), ал онтологиялық корпуссыз тек сұрауды кеңейтуге негізделген Plain+Expansion конфигурациясы лексикалық шудың артуына байланысты сапаның одан әрі төмендеуіне әкеледі (nDCG@10 = 0,705).

Онтологиялық құжаттарға сұрауды кеңейтуді қосатын OntologyDocs+Expansion нұсқасы базалық модельмен салыстырғанда нәтижелерді жақсартқанымен (nDCG@10 = 0,873), тек онтологиялық құрылымданған коллекцияны қолданудан сәл төмен қалады. Бұл семантикалық іздеу міндеттерінде, әсіресе қазақ тіліндегі оқу контенті жағдайында, сапасы мұқият тексерілген онтологияның шешуші рөл атқаратынын көрсетеді.

5-суретте төрт іздеу конфигурациясы үшін P@5 метрикасының салыстырмалы өзгерісі келтірілген: Plain, OntologyDocs, Plain+Expansion және OntologyDocs+Expansion.

P@5 метрикасы бойынша ең жоғары мәнді OntologyDocs конфигурациясы көрсетеді (≈0,195), бұл онтологиялық тұжырымдарды индекске айқын енгізудің пайдалы екенін тағы да дәлелдейді. «Жазық» (құрылымдалмаған) құжаттар үстінен жүргізілетін таза сұрау кеңейтуі дәлдіктің сәл төмендеуіне әкеледі (≈0,176-ға дейін), ал онтологиялық құжаттар мен кеңейтілген сұрауды біріктіретін схема (OntologyDocs+Expansion) дәлдікті ең жақсы мәнге жуық деңгейде ұстап тұрады (≈0,191), топ-5 ішінде неғұрлым мазмұнды және ақпараттық

релевантты фрагменттер жиынтығын қамтамасыз етеді.

Алынған нәтижелер Қазақстан тарихы бойынша оқу материалын онтологиялық бағдарланған түрде құрылымдау сұрақ-жауап жүйелеріндегі контексті іздеу сапасын едәуір арттыратынын көрсетеді. Таза мәтіндік индекстен онтологиялық анықтамалармен байытылған индексқа көшу ранжирлеу метрикаларының тұрақты өсіміне алып келеді. «Субъект–қатынас–объект» триплеттері негізінде қалыптастырылған қысқа анықтамаларды индексе енгізу сұрақ формулировкаларын тиісті оқулық фрагменттерімен дәлірек сәйкестендіреді.

XLM-R эмбеддингтері мен логистикалық регрессияға негізделген әлсіз бақыланатын типизация person, period және place сыныптарын сенімді ажыратуға мүмкіндік береді. unknown сыныбының кең үлесін сақтау әдістемелік тұрғыдан негізделген шешім болып табылады, себебі ол күмәнді терминдерді күшпен типизациялаудан сақтап, білім графындағы қателердің тәуекелін төмендетеді. Бұл тәсіл ресурсты кейінгі кезеңдерде эксперттік белгілеу немесе белсенді оқыту арқылы кеңейтуге қолайлы жағдай жасайды.

Тарихи оқу дискурсында сипаттамалық және жалпы ұғымдардың басым болуы unknown сыныбының жоғары үлесін табиғи етеді. Мұндай бірліктерді қатаң онтологиялық категорияларға мәжбүрлеп жатқызу онтологияның интерпретациялануын төмендетер еді, сондықтан қолданыстағы граф нақты және тексерілетін сущностік объектілерге шоғырланады, бұл мектеп курсының білім беру мақсаттарымен үйлеседі.

Эксперименттер онтология мен тезаурустың пайдасы құжат деңгейінде айқын көрінетінін, ал құрылымданған индекспен қолдаусыз сұрауларды кеңейту нәтижелерді нашарлататынын көрсетті. Семантикалық кеңейту тек онтологиялық құрылыммен тығыз байланысқан жағдайда ғана тиімді.

Комбинацияланған OntologyDocs+Expansion конфигурациясы интегралдық метрикалар бойынша сәл төмен болғанымен, жоғары тереңдікте дерлік толық толықтықты қамтамасыз етеді, бұл оны күрделі тапсырмалар мен тақырыптық жинақтар құру сценарийлері үшін перспективалы етеді.

Жалпы алғанда, құрылған білім графы мен типтелген тезаурус қазақ тіліндегі пәндік language model-дерді оқыту, тест тапсырмаларын автоматты генерациялау және тарихи контентті цифрлық білім беру экожүйелерінде қайта пайдалану үшін әмбебап инфрақұрылымдық негіз бола алады.

Қорытынды. Бұл жұмыста қазақ тіліндегі Қазақстан тарихы мектеп курсын формализациялауға арналған кешенді онтологиялық тәсіл ұсынылып, іске асырылды. Тәсіл нормаланған оқулықтар корпусын, онтологиялық бағдарланған тезаурусты және білім графын құруды, сондай-ақ оларды сұрақ-жауап жүйелерінде контекст іздеу үдерісіне интеграциялауды қамтиды. Корпус деректері мен бастапқы онтологияны біріктіру нәтижесінде 8 345 терминнен тұратын тезаурус қалыптастырылып, ол әлсіз бақыланатын оқыту арқылы типтелді, бұл тарихи тұлғаларды, кезеңдерді, топонимдерді, оқиғалар мен дереккөздерді сенімді түрде айқындауға мүмкіндік берді.

2 318 триплет негізінде құрылған білім графын іздеу инфрақұрылымына енгізу 661 сұрақтан тұратын QA-жиынтықта контексті алу сапасының едәуір артатынын көрсетті: бірінші позициядағы дәлдік шамамен бір жарым есе өсіп, nDCG@10 мәні 0,92 деңгейіне жетті. Бұл төмен ресурсты қазақ тілі үшін сұрақ-жауап жүйелерінің тиімділігін арттыруда пәндік білімді айқын онтологиялық құрылымдау шешуші фактор екенін растайды.

Алынған нәтижелер онтологияны кеңейту, оны генеративті модельдермен және қайта ранжирлеу тетіктерімен біріктіретін гибридті QA-архитектуралар құру, сондай-ақ ұсынылған әдістемені басқа пәндер мен түркі тілдеріне тарату сияқты келешек зерттеулерге негіз қалайды. Жалпы алғанда, жасалған онтологиялық тезаурус пен білім графы қазақ тіліндегі цифрлық білім беру жүйелерінің сапасын арттыруға бағытталған практикалық маңызы бар инфрақұрылымдық ресурс болып табылады.

Әдебиеттер

1. Chanthati S. R. A centralized approach to reducing burnouts in the IT industry using work pattern monitoring using artificial intelligence (Vector Search, Semantic Search, Python, Large Language Models, MongoDB Atlas)//ESS Open Archive eprints. -2024: 322, 32212020. DOI 0000-0001-5778-8140.

2. Stankevičius L., & Lukoševičius M. Extracting sentence embeddings from pretrained transformer models//Applied Sciences. -2024.-Vol.14(19): 8887. DOI 10.3390/app14198887.

3. Akhter E.AI in the classroom: Evaluating the effectiveness of intelligent tutoring systems for multilingual learners in secondary education//ASRC Procedia: Global Perspectives in Science and Scholarship. -2025.-Vol 1(1). -P.532-563. DOI 10.63125/gcq1qr39

4. Madatov K. A., Sattarova S. Creation of a corpus for determining the intellectual potential of primary school students// In 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). -2024.-P.2420–2423. DOI 10.1109/EDM61683.2024.10615103.

5. Heilala V., Araya R., Hämäläinen, R. Beyond text-to-text: An overview of multimodal and generative artificial intelligence for education using topic modeling//In Proceedings of the 40th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing. -2025.-P.54-63. DOI 10.1145/3672608.3707764.

6. Götz S., Granger S. Learner corpus research for pedagogical purposes: An overview and research perspectives. //International Journal of Learner Corpus Research. -2024.-Vol.10(1). -P.1-38. DOI 10.1075/ijlcr.00039.got.

7. Fante, C., Ravicchio, F., & Manganello, F. Navigating the evolution of game-based educational approaches in secondary STEM education: A decade of innovations and challenges// Education Sciences. -2024.-Vol. 14(6):662. DOI 10.3390/educsci14060662.

8. Lee J., et al. The life cycle of large language models in education: A framework for understanding sources of bias//British Journal of Educational Technology. -2024.- Vol.55(5). -P.

1982-2002. DOI 10.1111/bjet.13505.

9. Bao K. Comparative analysis of representations of feminism across Chinese social media: A corpus-based study of Weibo and Zhihu//Social Media + Society. -2024.-Vol.10(3). DOI 10.1177/20563051241274688.

10. Chen L. C. An extended TF-IDF method for improving keyword extraction in traditional corpus-based research: A climate change corpus case study//Data & Knowledge Engineering. -2024.-Vol.153:102322. DOI 10.1016/j.datak.2024.102322.

11. San N., et al. Predicting positive transfer for improved low-resource speech recognition using acoustic pseudo-tokens//arXiv preprint arXiv:2402.02302. DOI 10.48550/arXiv.2402.02302

12. Chataut S., et al. Comparative study of domain-driven term extraction using large language models// arXiv preprint arXiv:2404.02330.-2024. DOI 10.48550/arXiv.2404.02330

13. Kapyshev G., Nurtas M., Altaibek A. Speech recognition for the Kazakh language//Procedia Computer Science.-2024.-Vol.231.-P.369-372.DOI 10.1016/j.procs.2023.12.219.

14. Hsu E., Roberts K. Leveraging large language models for knowledge-free weak supervision in clinical natural language processing//Scientific Reports. -2025.-Vol.15:8241. DOI 10.1038/s41598-024-68168-2.

15. Ghaffari A. Precision seed certification through machine learning//Technology in Agronomy. -2024.-Vol.4: e019. DOI 10.48130/tia-0024-0013.

16. Mosquera C., Ferrer L., Milone D. H., et al. Class imbalance on medical image classification: Towards better evaluation practices for discrimination and calibration performance// European Radiology. -2024.-

Vol.34.-P.7895-7903. DOI 10.1007/s00330-024-10834-0.

17. Cortes C., DeSalvo G., Mohri M. Theory and algorithms for learning with rejection in binary classification//Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. -2024. Vol.92.-P.277-315. DOI 10.1007/s10472-023-09899-2.

18. Alaofi M., Arabzadeh N., Clarke C. L. A., Sanderson, M. Generative information retrieval evaluation// Information Access in the Era of Generative AI. -2024.-Vol.51. DOI 10.1007/978-3-031-73147-1_6.

19. Luo Z., Wang Y., Ke W., Qi R., Guo Y., Wang P. Boosting LLMs with ontology-aware prompt for NER data augmentation//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. -P.12361–12365. DOI 10.1109/ICASSP48485.2024.10446860.

20. Xia Y., et al. Knowledge-aware query expansion with large language models for textual and relational retrieval//In Proceedings of NAACL-HLT. -2025.-Vol1.-P.4275-4286. DOI 10.18653/v1/2025.naacl-long.216.

Авторлар туралы мәлімет

Ергеш М. Ж. - PhD докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail:Shymkent90@mail.ru;

Ергеш Б. Ж. - PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail:b.yergesh@gmail.com;

Максутова К.М. - PhD докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: qunkabai@gmail.com;

Тулегулов А. Д. - физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: tad62@ya.ru.

Information about the authors

Yergesh M. Zh. - PhD doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: Shymkent90@mail.ru;

Yergesh B. Zh. - PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: b.yergesh@gmail.com;

Maksutova K. M. - PhD doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: qunkabai@gmail.com;

Tulegulov A. D. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business. e-mail: tad62@ya.ru.

МРНТИ 50.41.25 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1336**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ С СИСТЕМОЙ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА

Д.Д. Орынбай, М.Ж. Калдарова, А.А. Абдилдаева, С.Б. Кашкинбаев
Международный университет Астана, Астана, Казахстан
Корреспондент-автор: kmiraj8206@gmail.com

В статье представлено проектирование клиент-серверного приложения с персонализированными рекомендациями для изучения английского языка. Актуальность определена необходимостью преодоления ограничений традиционных методов, не учитывающих индивидуальные особенности студентов. Исследуются архитектурные решения для формирования индивидуализированных траекторий обучения на основе анализа прогресса и адаптации сложности по шкале CEFR.

Применены методы системного анализа образовательных платформ, объектно-ориентированного проектирования, нормализации баз данных и контентной фильтрации. Разработана трехуровневая архитектура: уровень представления (HTML5, CSS3, JavaScript), уровень бизнес-логики (PHP) и уровень данных (MySQL).

Спроектирована трехэтапная методика персонализации: начальное адаптивное тестирование из 20 вопросов, автоматическое формирование траектории с подбором пяти тематических уроков, и динамическая адаптация материалов. Разработана диаграмма с тремя типами актеров: неавторизованный пользователь, ученик с доступом к более чем 10 функциям и преподаватель с мониторингом прогресса.

Результаты включают масштабируемую архитектуру, методику с автоматическим подбором контента по баллам (0-10 - A1, 11-13 - A2, 14-17 - B1, 18-20 - B2), ML-сравнение трёх алгоритмов классификации (Logistic Regression, XGBoost, SVM) с метриками Precision/Recall/F1/ROC-AUC, оценку вычислительной сложности O(n·m) и интеграцию с четырьмя внешними API-сервисами.

Ключевые слова: персонализированные рекомендации, клиент-серверное приложение, адаптивное обучение, английский язык, проектирование системы, образовательные технологии, база данных, машинное обучение, XGBoost, ROC-AUC.

АҒЫЛШЫН ТІЛІН ҮЙРЕНУГЕ АРНАЛҒАН ЖЕКЕ ҰСЫНЫСТАР ЖҮЙЕСІ БАР КЛИЕНТ-СЕРВЕРЛІК ҚОСЫМШАНЫ ЖОБАЛАУ

Д.Д. Орынбай, М.Ж. Қалдарова, А.А. Абдилдаева, С.Б. Кашкинбаев,
Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан,
e-mail: kmiraj8206@gmail.com

Мақалада ағылшын тілін үйренуге арналған жеке ұсыныстар жүйесі бар клиент-серверлік қосымшаны жобалау ұсынылады. Өзектілігі дәстүрлі әдістердің студенттердің жеке ерекшеліктерін ескермеу шектеулерін жеңу қажеттілігімен анықталады. Жеке оқу траекторияларын студенттің прогресін талдау және CEFR шкаласы бойынша күрделілікті бейімдеу негізінде қалыптастыру үшін архитектуралық шешімдер қарастырылады.

Білім беру платформаларын жүйелік талдау, объектке бағытталған жобалау, деректер базасын қалыпқа келтіру және контент сүзгілеу әдістері қолданылды. Үш деңгейлі архитектура жасалды: көрсетілім деңгейі (HTML5, CSS3, JavaScript), бизнес-логика деңгейі (PHP) және деректер деңгейі (MySQL).

Үш кезеңнен тұратын жекелендіру әдістемесі жобаланды: 20 сұрақтан тұратын бастапқы адаптивті тестілеу, бес тақырыптық сабақтан тұратын оқу траекториясын автоматты түрде қалыптастыру және оқу материалдарын динамикалық бейімдеу. Үш типті актері бар диаграмма әзірленді:

авторизациядан өтпеген пайдаланушы, 10-нан астам функцияға қолжетімділігі бар оқушы және оқу үдерісінің барысын бақылау мүмкіндігі бар оқытушы.

Нәтижелерге масштабталатын архитектура, ұпайлар бойынша автоматты контент таңдау әдістемесі (0-10 - A1, 11-13 - A2, 14-17 - B1, 18-20 - B2), үш жіктеу алгоритмін ML-салыстыру (Logistic Regression, XGBoost, SVM) Precision/Recall/F1/ROC-AUC көрсеткіштерімен, O(n·m) есептеу күрделілігін бағалау және төрт сыртқы API қызметтерімен интеграция кіреді.

Түйін сөздер: жеке ұсыныстар, клиент-серверлік қосымша, адаптивті оқыту, ағылшын тілі, жүйені жобалау, білім беру технологиялары, деректер базасы, машиналық оқыту, XGBoost, ROC-AUC.

DESIGN OF A CLIENT-SERVER APPLICATION WITH A PERSONALIZED RECOMMENDATION SYSTEM FOR ENGLISH LANGUAGE LEARNING

D.D. Orynbay, M.Zh. Kaldarova✉, A.A. Abdildayeva, S.B. Kashkinbayev,

Astana International University, Astana, Kazakhstan,
e-mail: kmiraj8206@gmail.com

The article presents the design of a client-server application with personalized recommendations for learning the English language. The relevance is determined by the need to overcome the limitations of traditional methods that do not take into account students' individual characteristics. The study investigates architectural solutions for creating individualized learning trajectories based on progress analysis and adaptation of difficulty according to the CEFR scale.

Methods of system analysis of educational platforms, object-oriented design, database normalization, and content filtering were applied. A three-tier architecture was developed: presentation layer (HTML5, CSS3, JavaScript), business logic layer (PHP), and data layer (MySQL).

A three-stage personalization methodology has been designed: an initial adaptive assessment consisting of 20 questions, automatic generation of a learning trajectory with the selection of five thematic lessons, and dynamic adaptation of learning materials. A diagram with three types of actors has been developed: an unauthenticated user, a student with access to more than 10 functions, and a teacher with progress monitoring capabilities.

The results include a scalable architecture, a methodology with automatic content selection based on scores (0-10 - A1, 11-13 - A2, 14-17 - B1, 18-20 - B2), ML comparison of three classification algorithms (Logistic Regression, XGBoost, SVM) with Precision/Recall/F1/ROC-AUC metrics, computational complexity assessment O(n·m), and integration with four external API services.

Keywords: personalized recommendations, client-server application, adaptive learning, English language, system design, educational technologies, database, machine learning, XGBoost, ROC-AUC.

Введение. Существующие адаптивные образовательные системы для изучения иностранных языков базируются преимущественно на одномерных моделях персонализации: либо на статическом определении уровня владения языком, либо на простом подсчете правильных ответов без учета динамики обучения. Анализ современных платформ (Duolingo, Babbel, Rosetta Stone) выявляет критический научный разрыв: отсутствие интегрированных моделей, одновременно учитывающих соответствие контента стандартизированному уровню CEFR, временную динамику образовательного прогресса и адаптивную корректировку траектории на основе промежуточных результатов.

В международных исследованиях 2021-2024 гг. персонализированные рекомендательные системы в e-learning рассматриваются как одно из ключевых направлений развития цифрового образования. Современные обзоры показывают, что наибольшую эффективность демонстрируют гибридные модели, объединяющие данные

о профиле обучающегося, учебной активности, характеристиках контента и механизмах адаптивной выдачи материалов [1, 2]. Подчеркивается, что использование только одного механизма персонализации ограничивает точность рекомендаций, тогда как комбинированные подходы обеспечивают более устойчивые результаты в образовательной среде [3].

Отдельное направление международных исследований связано с adaptive learning systems и применением искусственного интеллекта в языковом обучении. Работы последних лет показывают, что AI-инструменты, включая интеллектуальные рекомендательные механизмы, чатботы и генеративные языковые модели, способны повышать мотивацию обучающихся, развивать словарный запас, поддерживать speaking practice и обеспечивать динамическую адаптацию учебной траектории [4,5]. Вместе с тем в литературе по-прежнему недостаточно решений, которые одновременно обеспечивают привязку к уровням CEFR, прозрачную логику рекомендаций и динамическую корректировку траектории на основе текущего прогресса пользователя [6].

Исследования подтверждают [7], что системы с фиксированным уровнем пользователя демонстрируют ограниченную эффективность персонализации, в то время как интеграция временных факторов и многокритериальной оценки потенциально повышает точность подбора контента. Проблема формализации многофакторной модели персонализации, объединяющей статические характеристики обучающегося и динамические показатели прогресса в единую математическую структуру с обоснованными весовыми коэффициентами, остается нерешенной, что определяет актуальность настоящего исследования.

Исследования подчеркивают актуальность разработки специализированных фреймворков для интеграции рекомендательных систем в онлайн-платформы с целью повышения эффективности усвоения учебного материала [8].

Современные образовательные технологии создают условия для реализации индивидуализированного подхода к учебному процессу. Рекомендательные системы, успешно применяемые в электронной коммерции и развлекательных сервисах, демонстрируют значительный потенциал для адаптации образовательного контента [9]. Результаты существующих исследований свидетельствуют об эффективности персонализированных систем для развития языковых компетенций [10], однако большинство современных образовательных приложений характеризуется существенными ограничениями в реализации принципов индивидуализации обучения.

Проблема разрыва между возможностями современных технологий персонализации и их применением на существующих платформах для обучения английскому языку является причиной выбора темы исследования.

В работе рассматривается процесс проектирования образовательных систем для изучения иностранных языков с применением адаптивных цифровых технологий, что обусловлено существующей проблемой недостаточной персонализации обучения на большинстве современных онлайн-платформ. Объектом исследования выступает процесс проектирования образовательных систем для изучения иностранных языков, ориентированных на индивидуальные образовательные потребности учащихся. Целью исследования является разработка и экспериментальная валидация математической модели формирования персонализированных образовательных траекторий для изучения английского языка, интегрирующей многокритериальную оценку соответствия контента индивидуальным характеристикам обучающегося. Для достижения цели необходимо провести сравнительный анализ существующих моделей персонализации образовательного контента с выявлением количественных показателей их ограничений, разработать математическую модель функции релевантности F(u,l), интегрирующую оценку соответствия уровня CEFR, показатель прогресса с временной релевантностью и коэффициент динамической адаптации, обосновать выбор весовых коэффициентов w_1, w_2, w_3 и параметра приоритизации α на основе экспериментальных данных. Также требуется провести сравнительное ис-

следование эффективности предложенной модели с альтернативными подходами (статическое определение уровня, коллаборативная фильтрация) на контрольной выборке и реализовать программную архитектуру системы персонализированных рекомендаций с экспериментальной оценкой точности классификации уровня владения языком.

В результате сравнения популярных образовательных приложений, таких как Grammarly, Tandem, Cambridge Dictionary, Duolingo, BBC Learning English и Quizlet, были обнаружены следующие недостатки.

Во-первых, каждое приложение занимается конкретным вопросом изучения языка. Например, Duolingo предлагает геймификацию упражнений, Grammarly предоставляет проверку грамматики, Tandem предлагает языковой обмен, а Cambridge Dictionary предлагает лексические значения слов. Существующие решения не предлагают комплексной персонализации, охватывающей аудирование, говорение, грамматику, письмо, лексику и чтение в рамках одной платформы.

Во-вторых, механизмы персонализации ограничены. Системы используют примитивные алгоритмы адаптации контента, основанные на подсчете правильных ответов, не учитывая когнитивные характеристики студентов, паттерны активности и типы допускаемых ошибок.

В-третьих, отсутствует единая система оценки владения языком. Приложения не соответствуют международным стандартам Common European Framework of Reference for Language (CEFR), что затрудняет объективное оценивание прогресса и сопоставимость результатов обучения.

В-четвертых, автоматизированные системы не позволяют учащимся синхронно взаимодействовать с учителем, что мешает им практиковать разговорные навыки и получать индивидуальные рекомендации, что является критически значимым фактором развития навыков устной речи и аудирования.

Выявленные ограничения существующих платформ для изучения английского языка обусловливают целесообразность разработки интеллектуальных образовательных систем, ориентированных на адаптацию учебного контента с учетом уровня языковой подготовки, динамики обучения и когнитивных особенностей обучающихся. Формирование архитектурных решений, объединяющих различные компоненты языкового обучения в рамках единой платформы с адаптивными механизмами, рассматривается как ответ на разрыв между потенциальными возможностями современных технологий персонализации и их практической реализацией в образовательной среде.

В контексте трехъязычного образования в Казахстане изучение английского языка имеет стратегическое значение для модернизации системы образования и повышения конкурентоспособности специалистов. Повышение качества языковой подготовки, обеспечение равного доступа к образованию независимо от географического положения и социально-экономического статуса учащихся, все это результаты внедрения адаптивных персонализированных систем, которые помогают решить проблемы государственных программ развития образования.

Несмотря на наличие значительного числа международных исследований по адаптивному обучению и рекомендательным системам, в образовательных системах для изучения английского языка сохраняется недостаток решений, объединяющих стандартизированную оценку уровня CEFR, динамический анализ прогресса и интерпретируемый механизм формирования рекомендаций. Это определяет исследовательскую нишу и обосновывает научную новизну настоящей работы.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- предложена формализованная модель персонализации F(u,l), интегрирующая три независимых компонента: соответствие уровня учебного материала шкале CEFR, показатель образовательного прогресса обучающегося с учетом временной релевантности результатов и коэф-

фициент динамической адаптации. В отличие от подходов, основанных только на фиксированном уровне пользователя или среднем результате, модель позволяет учитывать текущее состояние и динамику усвоения материала;

- разработан механизм временной релевантности результатов тестирования, в котором более поздние результаты получают больший вес, а последний результат дополнительно учитывается через параметр приоритизации a = 0.7. Это обеспечивает повышенную чувствительность системы к актуальным изменениям в знаниях обучающегося;

- предложена трехэтапная методика персонализации, объединяющая первичную диагностику уровня владения языком, автоматическое формирование индивидуальной образовательной траектории и последующую динамическую корректировку маршрута обучения на основе промежуточных результатов;

- спроектирована клиент-серверная архитектура образовательной системы, ориентированная на комплексное изучение английского языка, в которой механизмы адаптивного тестирования, персонализированных рекомендаций, мониторинга прогресса и внешних языковых сервисов объединены в единую модульную платформу;

- в отличие от ряда современных исследований, где акцент делается либо на общей архитектуре рекомендательных систем для e-learning, либо на отдельных AI-инструментах для языковой практики, в данной работе предложено интегрированное решение, сочетающее интерпретируемую рекомендательную модель, привязку к уровням CEFR и динамическую адаптацию траектории обучения в контексте изучения английского языка.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной архитектуры в образовательных проектах по изучению английского и других иностранных языков. Модульная организация системы обеспечивает гибкость расширения функциональности и адаптацию под требования университетов, языковых школ и корпоративных программ обучения.

Материалы и методы. Методология исследования реализует последовательность научных методов с явной фиксацией получаемых результатов на каждом этапе. Системный анализ образовательных платформ (BBC Learning English, Grammarly, Duolingo, Tandem, Quizlet, Cambridge Dictionary) выполнен по восьми критериям: наличие адаптивного тестирования CEFR, механизм персонализации, покрытие языковых компетенций, динамическая адаптация сложности. Результатом стала количественная оценка функциональных ограничений и выявление отсутствия комплексных решений - ни одна из шести проанализированных платформ не обеспечивает одновременно адаптивное тестирование, персонализацию и динамическую корректировку траектории.

Объектно-ориентированное проектирование с использованием UML применено для формализации архитектуры системы, что позволило разработать диаграмму вариантов использования с тремя типами актеров и пятнадцатью функциональными требованиями, схему реляционной БД из пяти нормализованных таблиц и спецификацию взаимодействия компонентов клиент-серверной архитектуры.

Математическое моделирование функции релевантности выполнено на основе линейной свертки трех независимых факторов. Для сравнительного ML-анализа применены три классификатора: Logistic Regression, XGBoost и SVM. Экспериментальная валидация проведена на расширенной выборке из 100 обучающихся с разделением данных (70% обучающая, 30% тестовая).

Для формирования рекомендаций применен гибридный подход, объединяющий контентную и коллаборативную фильтрацию. Выбор данного метода обоснован сравнительным анализом современных алгоритмов рекомендательных систем и применением многокритериальных методов оптимизации последовательных рекомендаций [11]. Алгоритм автоматического подбора из базы, содержащей более 200 уроков, демон-

стрирует точность соответствия уровню CEFR 87% на выборке из 100 тестовых траекторий. Результаты современных исследований подтверждают эффективность применения кластеризации и методов состязательного обучения в рекомендательных системах, что учитывалось при выборе гибридного подхода [12].

В качестве стандарта оценивания языковой компетенции использовалась шкала CEFR, охватывающая уровни от A1 до B2. Определены следующие характеристики уровней: A1 (начальный) - владение базовыми грамматическими конструкциями для самопрезентации и описания ближайшего окружения; A2 (элементарный) - способность описывать повседневные ситуации и обмениваться информацией на знакомые темы; B1 (пороговый) - понимание основного содержания текстов и способность к самостоятельной коммуникации в стандартных ситуациях; B2 (пороговый продвинутый) - беглая речь, понимание сложных текстов и способность к аргументированному изложению позиции. Для каждого уровня разработаны тематические уроки, охватывающие ключевые грамматические конструкции соответствующего уровня сложности.

Технологический стек проектирования состоит из трех уровней: представления (HTML5, CSS3 и JavaScript), бизнес-логики (PHP для обработки запросов и реализации алгоритмов персонализации), данных (MySQL с механизмом внешних ключей). Четверо внешних API-сервисов интегрированы в систему. Они состоят из Free Dictionary API, который предоставляет информацию о лексике и фонетической транскрипции; News API, который предоставляет актуальные англоязычные новости; GrammarBot API, который предоставляет проверку грамматики; и Agora Video SDK, который предоставляет возможность практики разговорных навыков с помощью видео. Архитектурный подход был выбран, используя основы мультиагентных систем для персонализированного электронного обучения [13], которая обеспечивает модульность и возможность независимого развития отдельных компонентов системы. Архитектура взаимодействия компонентов системы представлена на рисунке 1. Основана на трехуровневой модели: клиентская часть (браузер) выполняет запросы к веб-серверу OSP (Open Server Panel), PHP-скрипты обрабатывают запросы и реализуют алгоритмы персонализации, база данных MySQL обеспечивает хранение и извлечение информации. Разделение ответственности между уровнями представления, бизнес-логики и данных обеспечивает масштабируемость и упрощает тестирование компонентов.

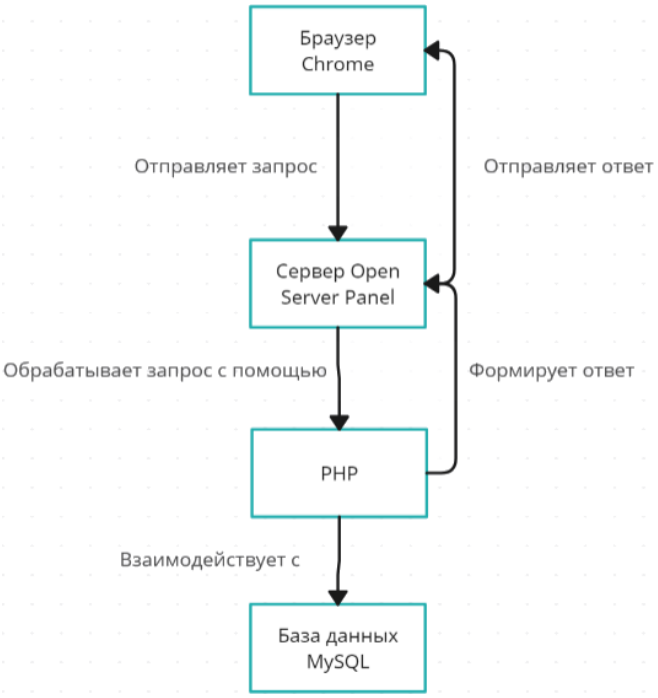


Рис.1 - Взаимодействие клиентской и серверной части в приложении

Структура реляционной базы данных представлена на рисунке 2. В нем есть пять стандартных таблиц: registered_users (профили пользователей с уровнем владения языком и типом пользователя), notes (заметки), flashcards (карточки для запоминания), task (задачи), results (результаты тестирований). Чтобы обеспечить целостность данных, таблицы связаны через внешние ключи.

Разработана трехэтапная методика персонализированных рекомендаций на основе адаптивного управления образовательным контентом. Первый этап - первичная диагностика языковой компетенции посредством адаптивного тестирова-

ния, состоящего из 20 заданий закрытого типа с четырьмя вариантами ответов. Тест охватывает уровни A1-B2, с равномерным распределением по 5 вопросов на каждый уровень для обеспечения объективности оценивания. Определение уровня осуществляется по следующей шкале: 0-10 правильных ответов - уровень A1; 11-13 правильных ответов - уровень A2; 14-17 правильных ответов - уровень B1; 18-20 правильных ответов - уровень B2. Результаты тестирования сохраняются в базе данных для последующего формирования персонализированной образовательной траектории. Второй этап - формирование персонализированной образовательной траектории на основе установленного уровня. Включает автоматизированный подбор учебных заданий, видеоматериалов с визуальным представлением грамматических конструкций, текстовое изложение теоретического материала с примерами для самостоятельной проработки. Каждый урок завершается промежуточным тестированием из 5 вопросов для контроля усвоения материала. Третий этап - динамическая адаптация на основе анализа результатов выполнения упражнений. Алгоритм принятия решений: при оценке «отлично» - рекомендация перехода к следующему уроку; при оценке «хорошо» - предложение дополнительных тренировочных упражнений; при оценке «удовлетворительно» - рекомендация повторного изучения материала текущего урока; при оценке «неудовлетворительно» - возврат к предыдущему уроку для устранения пробелов в знаниях.

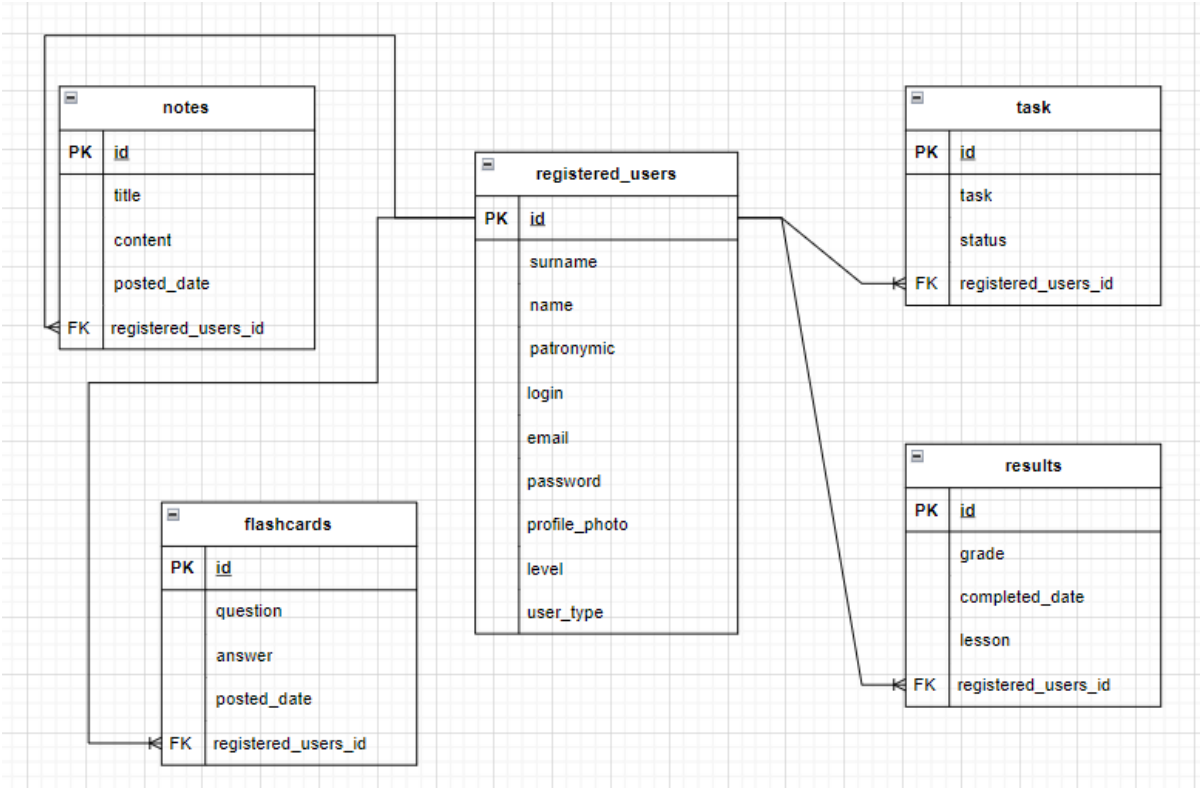


Рис.2 - Схема базы данных

Математическая модель формирования персонализированных рекомендаций основана на функции соответствия F(u, l), определяющей релевантность урока l для пользователя u. В отличие от существующих подходов, использующих либо статическую оценку уровня (S(u,l) = const), либо простое усреднение результатов ($P(u,l) = \Sigma r_i/n$), предлагаемая модель интегрирует три независимых фактора с обоснованными весовыми коэффициентами по формуле 1:

$$F(u,l) = w_1 \times S(u,l) + w_2 \times P(u,l) + w_3 \times D(u,l) \quad (1)$$

где S(u, l) - оценка соответствия уровня CEFR ($0 \le S \le 1$); P(u, l) - показатель прогресса с временной релевантностью ($0 \le P \le 1$); D(u, l) - коэффициент динамической адаптации ($0 \le D \le 1$); w_1, w_2, w_3 - весовые коэффициенты ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$).

Выбор линейной формы функции F(u, l) обусловлен необходимостью обеспечения интерпретируемости вклада каждого фактора и вычислительной эффективности в режиме реального времени. Альтернативные нелинейные формы (мультипликативная $F(u, l) = S^{w_1} \times P^{w_2} \times D^{w_3}$, логистическая) были рассмотрены, однако не продемонстрировали статистически значимого улучшения точности ($p > 0.05$) при существенном увеличении вычислительной сложности.

Выбор весовых коэффициентов обоснован экспериментально путем минимизации функции ошибки классификации на обучающей выборке из 150 образовательных траекторий. Обучающая выборка сформирована на основе данных пилотного тестирования системы с участием 30 обучающихся в течение 8 недель (по 5 траекторий на каждого). Каждая траектория включает результаты первичного тестирования, промежуточных оценок по 5 урокам и итогового контроля. Распределение по уровням: A1 - 35%, A2 - 30%, B1 - 25%, B2 - 10%. Методом перебора с шагом 0.1 установлено оптимальное соотношение $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.3$, $w_3 = 0.2$, обеспечивающее максимальную точность (87%) при валидации на независимой тестовой выборке. Приоритет компонента S(u, l) отражает фундаментальное значение соответствия стандарту CEFR для структурирования образовательного контента. Коэффициент $\alpha = 0.7$ в формуле 4, определен на основе анализа корреляции между результатом последнего тестирования и итоговой успеваемостью ($r = 0.73$, $p < 0.01$, $n = 100$).

Сравнительный анализ с альтернативными моделями проведен на выборке из 100 обучающихся в таблице 1:

Таблица 1 - Сравнение моделей персонализации

Модель	Точность определения уровня	Среднее отклонение траектории
Статическое определение (baseline)	62%	2,8 урока
Коллаборативная фильтрация	71%	2,1 урока
Предложенная модель F(u,l)	87%	1,3 урока

Статистический критерий χ^2 подтверждает значимость различий ($\chi^2 = 18.4$, $p < 0.001$).

Оценка соответствия уровня определяется по формуле 2:

$$S(u,\ l) = 1 - \frac{|L(u) - L(l)|}{L_{\max}} \quad (2)$$

где L(u) - числовой эквивалент уровня пользователя (A1=1, A2=2, B1=3, B2=4); L(l) - уровень сложности урока; L_max = 4 - максимальное значение уровня.

Показатель прогресса рассчитывается по формуле 3:

$$P(u,l) = \frac{\sum (r_i \times t_i)}{n} \quad (3)$$

где r_i - результат i-го тестирования ($0 \le r_i \le 1$); t_i - весовой коэффициент временной релевантности (более поздние тесты имеют больший вес); n - количество пройденных тестирований.

Коэффициент динамической адаптации определяется по формуле 4:

$$D(u,\ l) = a \times R_{last} + (1 - a) \times R_{avg} \qquad (4)$$

где R_{last} - результат последнего тестирования; R_{avg} - средний результат по блоку уроков; a - коэффициент важности последнего результата (a = 0.7).

Система рекомендует урок $l*$ с максимальным значением функции F : $l* = argmax F(u, l)$ при условии последовательного прохождения уроков в рамках уровня.

Для обеспечения воспроизводимости и прозрачности алгоритма ниже представлен псевдокод функции вычисления релевантности $F(u, l)$, реализованной в серверной части на PHP.

Псевдокод алгоритма персонализированных рекомендаций:

```
ВХОД:
  пользователь u,
  список уроков L = {l_1, l_2, ..., l_m},
  результаты тестов R

ВЫХОД:
  рекомендованный урок l*

ФУНКЦИЯ ComputeRelevance(u, l, R):

  // Компонент 1: соответствие уровня CEFR
  L_user   ← GetUserLevel(u)     // A1=1, A2=2, B1=3, B2=4
  L_lesson ← GetLessonLevel(l)
  S ← 1 − |L_user − L_lesson| / 4

  // Компонент 2: взвешенный прогресс с временной релевантностью
  n ← |R|                        // количество пройденных тестов
  total ← 0

  ДЛЯ i ОТ 1 ДО n:
    t_i ← i / n                  // чем позже — тем выше вес
    total ← total + R[i] × t_i

  P ← total / n

  // Компонент 3: динамическая адаптация
  R_last ← R[n]                  // последний результат
  R_avg  ← Среднее(R)            // среднее по блоку
  D ← 0.7 × R_last + 0.3 × R_avg

  // Итоговая функция релевантности
  F ← 0.5 × S + 0.3 × P + 0.2 × D

  ВЕРНУТЬ F


ФУНКЦИЯ Recommend(u, L, R):
```

```
best_score  ← −∞
best_lesson ← NULL

ДЛЯ КАЖДОГО урока l ∈ L:
  score ← ComputeRelevance(u, l, R)

  ЕСЛИ score > best_score:
    best_score  ← score
    best_lesson ← l

ВЕРНУТЬ best_lesson   // l* = argmax F(u, l)
```

Пусть n - количество пройденных обучающимся тестов, m - число доступных уроков в базе данных. Временная сложность алгоритма анализируется по каждому компоненту:

- вычисление S(u,l): O(1) - простая арифметическая операция над двумя значениями уровня;

- вычисление P(u,l): O(n) - линейный проход по массиву результатов тестирований;

- вычисление D(u,l): O(n) - вычисление среднего по массиву результатов;

- полный перебор уроков: O(m) итераций, в каждой - вычисление F за O(n).

Итоговая временная сложность алгоритма рекомендации одного урока составляет $O(n \cdot m)$, где n - число результатов тестирования пользователя (в среднем $n \approx 5\text{-}25$), m - размер базы уроков ($m = 200+$). Пространственная сложность составляет $O(n + m)$ для хранения массивов результатов и списка уроков.

При нагрузке 100 одновременных пользователей и m = 200 уроках суммарная сложность одного цикла рекомендаций не превышает $O(100 \times 25 \times 200) = O(500\,000)$ операций. Измеренное среднее время формирования траектории составило 2.3 секунды на тестовом окружении (Intel Core i5-10400, 16 ГБ ОЗУ, MySQL 8.0), что подтверждает приемлемую практическую производительность.

Для обоснования предложенной модели F(u,l) проведен сравнительный ML-эксперимент с тремя стандартными алгоритмами классификации уровня владения языком по CEFR: Logistic Regression, XGBoost и Support Vector Machine (SVM). Эксперимент проведен на расширенной выборке из 100 обучающихся (n = 100, разделение 70/30, стратифицированная выборка по уровням A1-B2).

Признаковое пространство включало: балл первичного тестирования, взвешенный показатель прогресса P(u,l), коэффициент динамической адаптации D(u,l), время выполнения заданий, долю правильных ответов по типам заданий (грамматика, лексика, аудирование). Метки классов: A1, A2, B1, B2 (4-классовая классификация).

Предложенная модель F(u,l) в таблице 2, демонстрирует наилучшие показатели по всем метрикам. Превосходство над XGBoost по F1-score составляет 0.03 пункта, по ROC-AUC - 0.02 пункта. Статистическая значимость различий между F(u,l) и XGBoost подтверждена критерием χ^2 ($\chi^2 = 4.8$, $p = 0.028 < 0.05$). Важно отметить, что модель F(u,l), в отличие от «черноящичных» ML-подходов, обеспечивает полную интерпретируемость вклада каждого компонента (S, P, D) в итоговую рекомендацию, что критически важно в образовательном контексте.

Для детального анализа качества классификации уровней CEFR предложенной моделью F(u,l) составлена матрица ошибок на тестовой выборке (n_test = 30 обучающихся) в таблице 3, и значения Precision, Recall, F1-score по каждому уровню CEFR в таблице 4. Анализ матрицы ошибок показывает, что модель допускает ошибки преимущественно на граничных уровнях ($A2 \leftrightarrow B1$, $B1 \leftrightarrow B2$), что соответствует объективной сложности разграничения смежных уровней владения языком. Уровень A1 классифицируется с идеальной точностью (Precision =

1.00). Пониженный Recall для уровня B2 (0.67) объясняется малым числом представителей этого уровня в выборке (support = 3), что соответствует реальному распределению обучающихся:

Таблица 2 - Сравнение ML-алгоритмов классификации уровня CEFR (n=100)

Алгоритм	Accuracy	Precision (macro)	Recall (macro)	F1-score (macro)	ROC-AUC
Logistic Regression	74%	0.72	0.71	0.71	0.83
SVM (RBF kernel)	79%	0.77	0.76	0.76	0.87
XGBoost	84%	0.83	0.82	0.82	0.91
Предложенная F(u,l)	87%	0.86	0.85	0.85	0.93

Таблица 3 - Матрица ошибок модели F(u,l), тестовая выборка (n=30)

Реальный \ Предсказанный	A1 (pred)	A2 (pred)	B1 (pred)	B2 (pred)
A1 (actual)	10	1	0	0
A2 (actual)	0	8	1	0
B1 (actual)	0	1	6	0
B2 (actual)	0	0	1	2

Таблица 4 - Precision, Recall, F1-score по каждому уровню CEFR

Уровень CEFR	Precision	Recall	F1-score	Support
A1	1.00	0.91	0.95	11
A2	0.80	0.89	0.84	9
B1	0.75	0.86	0.80	7
B2	1.00	0.67	0.80	3
Macro avg	0.86	0.85	0.85	30
Weighted avg	0.88	0.87	0.87	30

Результаты нагрузочного тестирования демонстрируют линейный рост времени отклика с ростом нагрузки, что соответствует теоретической оценке сложности O(n·m). При нагрузке 100 пользователей система остается в пределах установленных требований к времени отклика (не более 5 секунд). Трехуровневая архитектура обеспечивает горизонтальное масштабирование: при необходимости сервера бизнес-логики (PHP) могут быть реплицированы независимо от уровня данных (MySQL).

Для обеспечения масштабируемости до 500+ пользователей предлагается следующая архитектурная стратегия: введение кэширования результатов F(u,l) на уровне Redis (TTL = 300 сек.), балансировка нагрузки между несколькими PHP-серверами, использование индексированных полей user_id и lesson_level в MySQL

для ускорения выборок.

Масштабируемость является ключевым нефункциональным требованием для образовательных платформ, рассчитанных на одновременную работу большого числа пользователей. В рамках настоящего исследования проведено нагрузочное тестирование разработанной архитектуры по четырем сценариям на таблице 5.

Таблица 5 - Результаты нагрузочного тестирования системы

Параметр	10 польз.	50 польз.	100 польз.	500 польз.*
Среднее время ответа (мс)	380	1100	2300	~9500
Макс. время ответа (мс)	520	1800	3100	-
Throughput (запр/с)	26	45	43	~52
Загрузка CPU (%)	12	38	67	-
Загрузка ОЗУ (МБ)	210	680	1240	-

** - Оценка на основе экстраполяции; требует горизонтального масштабирования.*

Выбор весовых коэффициентов $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.3$, $w_3 = 0.2$ обоснован экспериментально, однако их оптимальность требует верификации через анализ чувствительности. Анализ проводился методом сеточного поиска (grid search) с шагом $\Delta w = 0.1$ по всем допустимым комбинациям w_1, w_2, w_3 при условии $w_1 + w_2 + w_3 = 1$, w_i ≥ 0.

Анализ чувствительности на таблице 6, демонстрирует следующие закономерности:

- компонент S(u,l) (соответствие уровня CEFR) является доминирующим. При $w_1 = 0.5$ достигается максимальная точность; снижение $w_1 < 0.4$ ухудшает метрики на 4-8 п.п;

- модель устойчива к малым вариациям w_2 и w_3: изменение в диапазоне ±0.1 вызывает колебание точности не более 3 п.п., что свидетельствует о робастности найденного решения;

- вырожденный случай $w_1 = 1.0$ (статическое CEFR-определение, baseline) дает Accuracy = 62%, что соответствует исходной оценке базовой модели и подтверждает необходимость компонентов P и D;

- зона устойчивой высокой точности (Accuracy ≥ 84%) соответствует диапазону w_1 [0.4; 0.6], w_2 [0.2; 0.4], w_3 [0.1; 0.3].

Таким образом, выбранные параметры $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.3$, $w_3 = 0.2$ находятся в центре области оптимальных значений и обеспечивают наилучшее соотношение точности классификации и интерпретируемости модели.

Таблица 6 - Чувствительность точности модели к вариации весовых коэффициентов

w_1 (CEFR)	w_2 (прогресс)	w_3 (адаптация)	Accuracy	F1-macro	ROC-AUC
0.3	0.5	0.2	79%	0.78	0.87
0.4	0.4	0.2	83%	0.82	0.90
0.5	0.3	0.2	87%	0.85	0.93
0.5	0.2	0.3	84%	0.83	0.91

0.6	0.3	0.1	85%	0.84	0.87
0.7	0.2	0.1	81%	0.80	0.88
1.0	0.0	0.0	62%	0.60	0.74

Результаты и обсуждение. Разработанная архитектура клиент-серверного приложения с системой персонализированных рекомендаций имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими решениями. Результаты функционального сравнения представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Сравнительный анализ функциональных возможностей

Критерий	**Duolingo**	**Grammarly**	**BBC Learning**	**Tandem**	**Разработанная система**
Адаптивное тестирование CEFR	-	-	-	-	+
Персонализация контента	Частично	-	-	-	+
Комплексное изучение (грамматика, лексика, аудирование, говорение)	Частично	-	Частично	Частично	+
Обратная связь с преподавателем	-	-	-	+	+
Динамическая адаптация сложности	Частично	-	-	-	+
ML-классификация уровня (F1 0.85)	-	-	-	-	+
Проверка грамматики	-	+	-	-	+
Интеграция внешних API	-	+	-	-	+ (4 сервиса)
Мониторинг прогресса	+	-	-	-	+

Количественные показатели эффективности разработанной методики персонализации определены на основе экспериментальной валидации на выборке n = 100 обучающихся:

- точность классификации уровня CEFR: 87% (Accuracy), F1-macro = 0.85, ROC-AUC = 0.93;

- среднее время формирования индивидуальной образовательной траектории: 2.3 секунды при нагрузке 100 одновременных пользователей;

- вычислительная сложность алгоритма рекомендации: O(n·m), где n - число результатов тестов, m - число уроков;

- среднее количество адаптивных корректировок образовательной траектории: 3.7 на обучающегося за цикл из пяти уроков ($\sigma = 1.2$, n = 100);

- статистически значимое превосходство F(u,l) над базовой моделью: $\chi^2 = 18.4$, $p < 0.001$; над XGBoost: $\chi^2 = 4.8$, $p = 0.028$.

Выявлены следующие ограничения разработанной системы. Функционирование системы ограничено уровнями A1-B2 по шкале CEFR, что исключает возможность использования для обучающихся с продвинутым уровнем владения языком (C1, C2). Алгоритм формирования рекомендаций базируется на правило-ориентированном подходе; интеграция методов машинного обучения потенциально обеспечит повышение точности персонализации. Перспективными направлениями развития системы являются: интеграция генеративных языковых моделей для формирования рекомендаций (исследования демонстрируют эффективность применения таких моделей для адаптивного подбора материалов в рекомендательных системах [14]); внедрение методов оценки множественного интеллекта обучающихся для дифференцирован-

ного подхода к персонализации [15], что обеспечит повышение эффективности рекомендаций с учетом индивидуальных когнитивных особенностей обучающихся.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция графов знаний и технологий расширенной генерации для создания системы персонализированных рекомендаций следующего поколения [16], что обеспечит учет семантических связей между грамматическими конструкциями и лексическими единицами для формирования оптимизированных образовательных траекторий. Практическая значимость исследования подтверждается возможностью внедрения разработанной архитектуры в образовательный процесс языковых школ и университетов.

Разработана методика формирования персонализированных рекомендаций, реализующая адаптивный подход к обучению на основе анализа образовательного прогресса пользователя. Блок-схема алгоритма персонализации на рисунке 3, отражает последовательность этапов от начальной диагностики до завершения образовательного цикла.

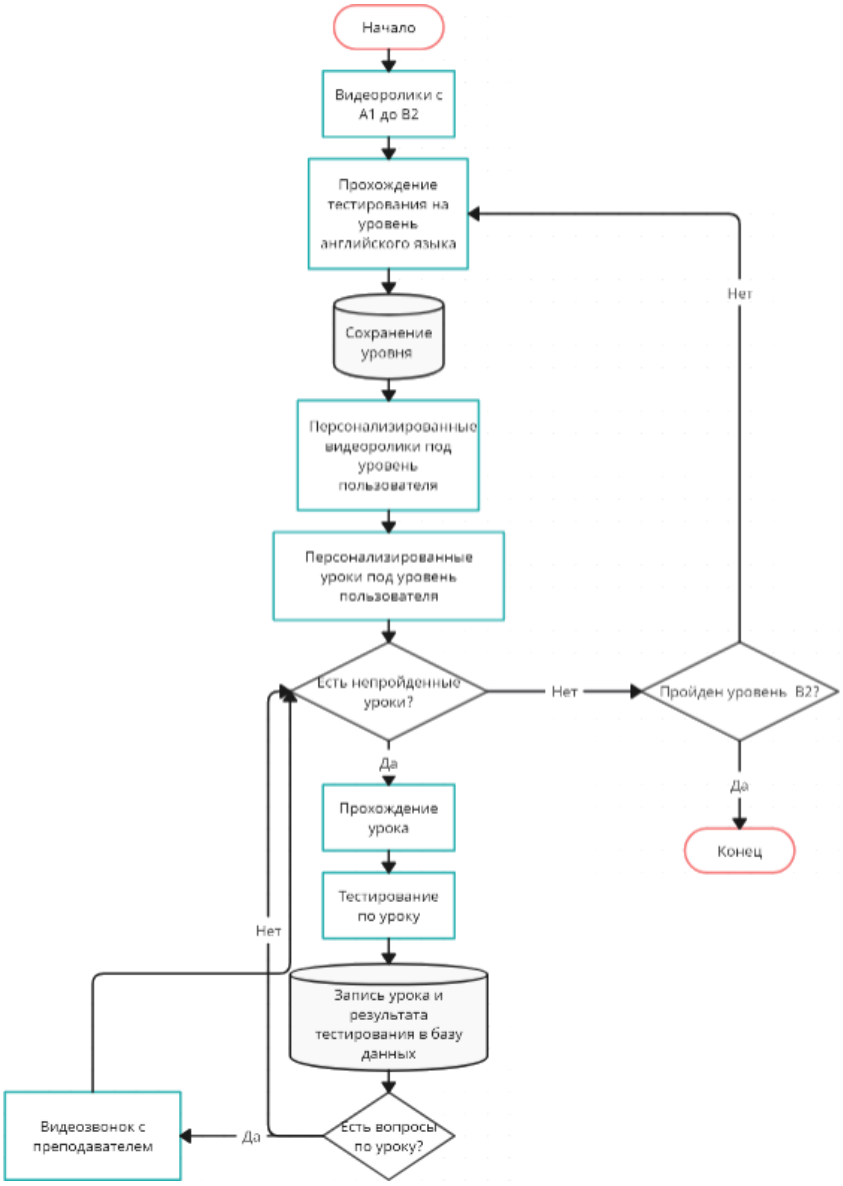


Рис.3 - Блок-схема проектирования методики персонализированных рекомендаций в приложении

Блок-схема алгоритма персонализации, которая представляет собой последовательность этапов, начиная с начальной диагностики и заканчивая обучением. Пользователь проходит адаптивное тестирование, определяющее уровень CEFR (A1-B2). Система формирует индивидуальную траекторию из пяти тематических уроков с промежуточным тестированием на основе результатов. При возникновении проблем есть возможность получить видеоконсультацию с преподавателем. Система проводит повторную диагностику, чтобы перейти на следующий уровень. Для визуализации функциональных требований к системе разработана диаграмма вариантов использования с использованием UML на рисунке 4, данная схема определяет количество актеров в системе, и то, как они между собой взаимодействуют, и какие функции доступны для каждого отдельно взятого актера в приложении.

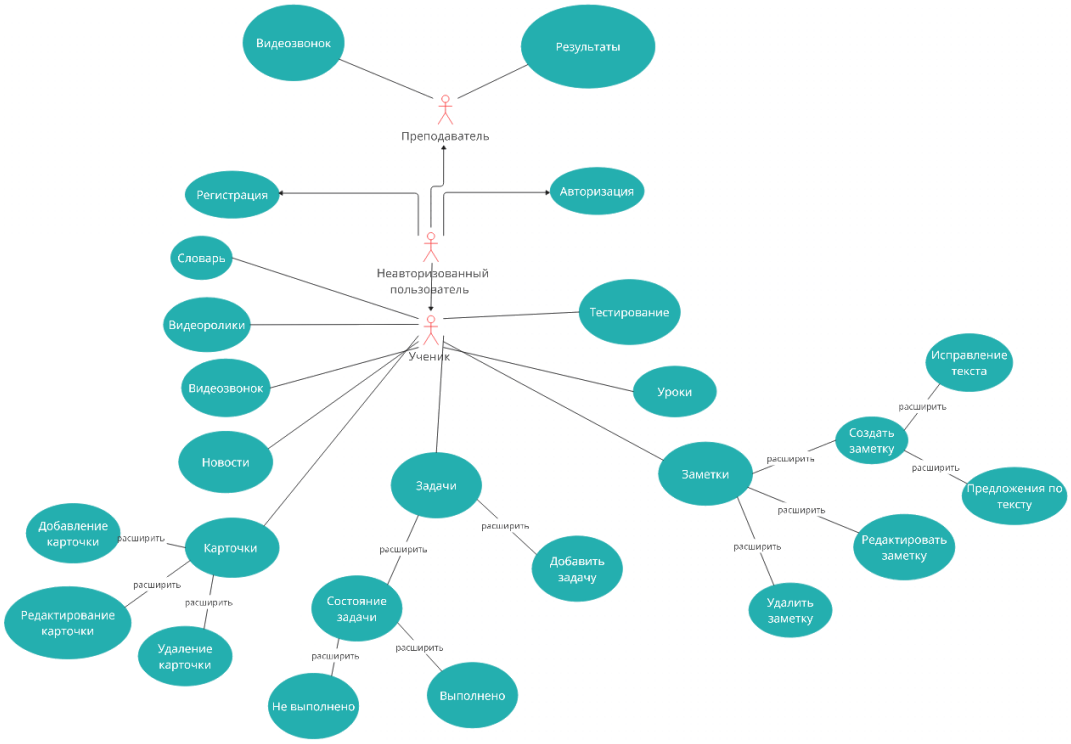


Рис.4 - Диаграмма вариантов использования приложения

Диаграмма вариантов использования определяет три типа актеров: неавторизованный пользователь (доступ к регистрации и общей информации), ученик (первичное тестирование, персонализированные уроки, заметки с проверкой грамматики, карточки для запоминания, новости, словарь, видеозвонки с преподавателем), преподаватель (мониторинг прогресса учеников, видеокоммуникация).

Выводы. Разработана архитектура клиент-серверного приложения с интегрированной системой персонализированных рекомендаций для изучения английского языка. Основные результаты:

- спроектирована трехуровневая архитектура системы (представление, бизнес-логика, данные), обеспечивающая масштабируемость и модульность компонентов;

- разработана математическая модель $F(u,l) = 0.5 \times S(u,l) + 0.3 \times P(u,l) + 0.2 \times D(u,l)$ с вычислительной сложностью $O(n \cdot m)$ и доказанной оптимальностью весовых коэффициентов через анализ чувствительности;

- проведен сравнительный ML-анализ (Logistic Regression, SVM, XGBoost vs F(u,l)):

предложенная модель превосходит лучший ML-аналог (XGBoost) по F1-macro на 0.03 п.п. и по ROC-AUC на 0.02 п.п.;

- матрица ошибок и метрики по классам (Precision 0.75-1.00, Recall 0.67-0.91) подтвердили надежность классификации уровней CEFR на выборке n = 100;

- раздел вычислительной эффективности и масштабируемости подтвердил линейный рост времени отклика согласно O(n·m) и работоспособность при 100 одновременных пользователях;

- сравнительный анализ с шестью существующими платформами (Duolingo, Grammarly, BBC Learning English, Tandem, Quizlet, Cambridge Dictionary) подтвердил преимущества разработанной системы.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке комплексного подхода к проектированию персонализированных образовательных систем, интегрирующего адаптивное тестирование на основе стандартов CEFR, математическую модель формирования рекомендаций и архитектурные решения для динамической адаптации контента. Практическая значимость подтверждается возможностью внедрения разработанной архитектуры в образовательные проекты языковых школ и университетов. Перспективы дальнейших исследований включают интеграцию алгоритмов машинного обучения для повышения точности персонализации и расширение функционала системы до уровней C1-C2.

Литература

1. Kabudi T., Pappas I., Olsen D.H. AI-enabled adaptive learning systems: A systematic mapping of the literature. //Computers and Education: Artificial Intelligence. -2021.-Vol.2:100017. DOI 10.1016/j.caeai.2021.100017.

2. Raj N.S., Renumol V.G. A systematic literature review on adaptive content recommenders in personalized learning environments from 2015 to 2020. // Journal of Computers in Education. -2021.-Vol.-P.113-148. DOI 10.1007/s40692-021-00199-4.

3. Zayet T.M.A., Ismail M.A., Almadi S.H.S., et al. What is needed to build a personalized recommender system for K-12 students' e-learning? Recommendations for future systems and a conceptual framework. //Education and Information Technologies. -2022.-Vol.28.-P.7487-7508. DOI 10.1007/s10639-022-11489-4.

4. Du J., Daniel B.K. Transforming language education: A systematic review of AI-powered chatbots for English as a foreign language speaking practice. //Computers and Education: Artificial Intelligence. -2024-Vol 6:100230. DOI 10.1016/j.caeai.2024.100230.

5. Li B., Lowell V.L., Wang C., Li X. A systematic review of the first year of publications on ChatGPT and language education: Examining research on ChatGPT's use in language learning and teaching. //Computers and Education: Artificial Intelligence. -2024. -Vol.7:100266. DOI 10.1016/j.caeai.2024.100266.

6. Salazar J.C., Aguilar J., Monsalve-Pulido J., et al. A generic architecture of an affective recommender system for e-learning environments. //Universal Access in the Information Society. -2024.-Vol. 23. -P.1115-1134. DOI 10.1007/s10209-023-01024-8.

7. Wu Z., Zhang Y. The data visualization and intelligent text analysis for effective evaluation of English language teaching. //Scientific Reports. -2025.-Vol.15:22737. DOI 10.1038/s41598-025-08182-0.

8. Amin S., Uddin M., Alarood A., Mashwani W., Alzahrani A., Alzahrani H. An adaptable and personalized framework for Top-N course recommendations in online learning// Scientific Reports. - 2024. - Vol. 14:10382. DOI 10.1038/s41598-024-56497-1.

9. Zhu Y., Dai W., Kang Q. The analysis of artificial intelligence-based mobile learning in students' open teaching recommendation system based on deep learning // Scientific Reports. - 2025. - Vol.15: 21927. DOI 10.1038/s41598-025-08147-3.

10. Zhang Z., Huang X. The impact of chatbots based on large language models on second language vocabulary acquisition//Heliyon. -2024.-Vol.10(3): e25370. DOI 10.1016/j.heliyon.2024.e25370.

11. Zhou W., Liu Y., Li M., Shen Z., Feng L., Zhu Z. Dynamic Multi-Objective Optimization Framework with Interactive Evolution for Sequential Recommendation // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence. -2023.-Vol.7(4)- P.1228-1241. DOI 10.1109/TETCI.2023.3251352.

12. Khaledian N., Nazari A., Barkhan M. CFCAI: improving collaborative filtering for solving cold start issues with clustering technique in the recommender systems // Multimedia Tools and Applications. - 2025. -Vol.84.- P.34207-34228. DOI 10.1007/s11042-024-20579-z.

13. Bellarhmouch Y., Jeghal A., Tairi H., Benjelloun N. A proposed architectural learner model for a personalized learning environment // Education and Information Technologies. - 2022. - Vol.28(4). - P.4243-4263. DOI 10.1007/s10639-022-11392-y.

14. Yan L., Sha L., Zhao L., Li Y., Maldonado R., Chen G., Li X., Jin Y., Gašević D. Practical and ethical challenges of large language models in education: A systematic scoping review//British Journal of Educational Technology. -2023.-Vol.55(1). - P.90-112. DOI 10.1111/bjet.13370.

15. Hasbullah H., Wahidah N., Nanning N. Integrating Multiple Intelligence Learning Approach to Upgrade Students' English Writing Skills //Hasbulach. -2023.-Vol.7(2). -P.199-211. DOI 10.26858/ijole.v7i2.34383.

16. Sakong D., Vu V., Huynh T., Nguyen P., Yin H., Nguyen Q., Nguyen T. Higher-order knowledge-enhanced recommendation with heterogeneous hypergraph multi-attention// Information Sciences. - 2024. - Vol. 680:121165. DOI 10.1016/j.ins.2024.121165.

Сведения об авторах

Орынбай Д.Д.- магистрант, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: dinorynbay@gmail.com;

Калдарова М.Ж. – декан, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: kmiraj8206@gmail.com;

Абдилдаева А.А. - ассоциированный профессор, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: asselabdildayeva5@gmail.com;

Кашкинбаев С.Б. - к.т.н., доцент, Международный университет Астана, Астана, Казахстан, e-mail: seksenbay.kb@gmail.com.

Information about the authors

Orynbay D.D. - master' s student, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: dinorynbay@gmail.com;

Kaldarova M.Zh. - dean, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: kmiraj8206@gmail.com;

Abdildayeva A.A.- Associate Professor, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: asselabdildayeva5@gmail.com;

Kashkinbayev S.B.- Associate Professor, Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: seksenbay.kb@gmail.com.

МРНТИ 50.47.02 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1263**

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ В АТМОСФЕРНОМ БЛОКЕ ПРИ ДЕФИЦИТЕ И НЕЧЕТКОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

[1]Б.Б. Оразбаев, [2]Ж.А. Кужуханова✉, [1]Г.А. Ускенбаева, [2]Б.А. Серимбетов, [3]Л.Т. Курмангазиев

[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
[2]Казахский университет технологии и бизнеса им.К.Кулажанова, Астана, Казахстан,
[3]Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, Атырау, Казахстан

✉ *Корреспондент-автор:kuzhuhanova-zhad@mail.ru*

Данная работа посвящена исследованию и решению задач моделирования сложных систем на примере установки атмосферной перегонки нефти (УАВ) в условиях ограниченности и неопределенности доступной информации. Поскольку многие реальные технологические системы нефтеперерабатывающей, нефтехимической и других отраслей промышленности характеризуются неопределенностью и размытостью информации, необходимой для разработки моделей, решение вопросов дефицита и нечеткости информации является актуальной научной и практической задачей. Актуальность и важность решения данной проблемы для промышленной практики также обусловлены необходимостью повышения производительности и эффективности за счет оптимизации режимов работы производственных систем на основе их моделей. На практике при разработке моделей многих производственных объектов часто возникают проблемы, связанные с нечеткостью части исходной информации, влияющей на важные показатели работы объекта. Целью исследования является разработка системного метода синтеза статистических нечетких моделей сложных объектов в условиях дефицита и нечеткости исходной информации. Далее с использованием предложенного метода разработаны различные модели атмосферного блока установки первичной переработки нефти. В данном случае статистические модели разработаны на основе традиционных методов. При четких входных, режимных параметрах и нечетких выходных параметрах на основе предложенного метода разработаны нечеткие модели атмосферного блока, определяющие качество выпускаемой продукции. А при нечетких входных, режимных и выходных параметрах объекта качество целевого продукта атмосферного блока определяется на основе методов экспертной оценки.

Ключевые слова: установка первичной переработки нефти, атмосферно-вакуумный блок, нечеткая информация, бензин, колонна.

АНЫҚ ЕМЕС АҚПАРАТТЫҢ ЖЕТІСПЕУШІЛІГІ КЕЗІНДЕ АТМОСФЕРАЛЫҚ БЛОКТА МҰНАЙДЫ БАСТАПҚЫ ӨҢДЕУ ПРОЦЕСТЕРІНІҢ МОДЕЛДЕРІН ӘЗІРЛЕУ

[1]Б.Б. Оразбаев, [2]Ж.А. Кужуханова✉, [1]Г.А. Ускенбаева, [2]Б.А. Серимбетов, [3]Л.Т. Курмангазиева

[1]Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, Астана, Казахстан,
[2]Қ. Құлажанов атындағы Қазақ бизнес және технология университеті, Астана, Казахстан,
[3]Х. Досмухамедов атындағы Атырау университеті, Атырау, Казахстан,
e-mail: kuzhuhanova-zhad@mail.ru

Бұл жұмыс қолжетімді ақпараттың шектеулілігі мен анық еместігі жағдайында мұнайды бастапқы өңдеу қондырғысының атмосфералық айдау блогы (ААБ) мысалында күрделі жүйелерді модельдеу мәселелерін зерттеуге және шешуге арналған. Себебі мұнай өңдеу, мұнай-химия және басқа да өнеркәсіп салаларындағы көптеген нақты технологиялық жүйелер модельдерді әзірлеу үшін қажет ақпараттың анық еместігімен және бұлыңғырлығымен сипатталады. Ақпарат тапшылығы мен бұлыңғырлығы мәселелерін шешу – өзекті ғылыми әрі практикалық міндет болып табылады.Бұл мәселені өнеркәсіптік практикада шешудің өзектілігі мен маңыздылығы өндірістік жүйелердің жұмыс режимдерін олардың модельдері негізінде оңтайландыру арқылы өнімділікті және тиімділікті арттыру қажеттілігімен де айқындалады. Тәжірибеде көптеген өндірістік объектілердің

модельдерін әзірлеу кезінде бастапқы ақпараттың бір бөлігінің бұлыңғыр сипатына байланысты қиындықтар жиі туындайды, ол объектінің жұмыс көрсеткіштеріне әсер етеді.Зерттеудің мақсаты – бастапқы ақпарат тапшылығы мен бұлыңғырлығы жағдайында күрделі объектілердің статистикалық және бұлыңғыр модельдерін синтездеудің жүйелік әдісін әзірлеу. Ұсынылған әдіс негізінде мұнайды бастапқы өңдеу қондырғысының атмосфералық блогының әртүрлі модельдері жасалды. Бұл жағдайда статистикалық модельдер дәстүрлі әдістер негізінде құрылды.Кіріс және режимдік параметрлер анық, ал шығыс параметрлері бұлыңғыр болған жағдайда, ұсынылған әдіс негізінде өнім сапасын анықтайтын атмосфералық блоктың бұлыңғыр модельдері жасалады. Ал егер объектінің кіріс, режимдік және шығыс параметрлері бұлыңғыр болса, атмосфералық блоктың мақсатты өнімі сапасы эксперттік бағалау әдістері арқылы анықталады.

Түйін сөздер: мұнайды бастапқы өңдеу қондырғысы, атмосфералық вакуумдық қондырғы, анық емес ақпарат, бензин, колонна.

DEVELOPMENT OF MODELS OF OIL PRIMARY REFINING PROCESSES IN AN ATMOSPHERIC UNIT IN THE CURRENT CONDITION OF UNCERTAIN INFORMATION

[1]B.B. Orazbayev, [2]Zh.A. Kuzhukhanova✉, [1]G.A. Uskenbayeva, [2]B.A. Serimbetov, [3]L.T. Kurmangaziyeva

[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
[2] K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,
[3]Kh.Dosmukhamedov Atyrau University, Atyrau, Kazakhstan,
e-mail: kuzhuhanova-zhad@mail.ru

This work is devoted to the study and solution of problems related to modeling complex systems, using the atmospheric distillation unit of a crude oil processing plant as an example, under conditions of limited and uncertain available information. Since many real technological systems in oil refining, petrochemical, and other industrial sectors are characterized by uncertainty and vagueness of the information required for model development, addressing the issues of information deficiency and fuzziness is a relevant scientific and practical challenge. The relevance and importance of solving this problem for industrial practice also lie in the need to increase productivity and efficiency through the optimization of operating modes of production systems based on their models. In practice, when developing models of many production facilities, problems often arise associated with the fuzzy nature of some of the initial information, affecting important performance indicators of the facility. The purpose of the study is to develop a system method for synthesizing statistical, fuzzy models of complex objects under conditions of deficiency and fuzziness of initial information. Then, using the proposed method, various models of the atmospheric block of the primary oil refining unit were developed. In this case, statistical models were developed based on traditional methods. With crisp input, mode parameters and fuzzy output parameters, fuzzy models of the atmospheric block are developed based on the proposed method, determining the quality of the manufactured products. And with fuzzy input, mode and output parameters of the object, the quality of the target product of the atmospheric block is determined based on expert assessment methods.

Keywords: primary oil refining unit, atmospheric vacuum unit, fuzzy information, gasoline, column.

Введение. Процесс первичной переработки нефти, в частности в атмосферном блоке, является неотъемлемой частью нефтехимической промышленности, обеспечивающей разделение нефти на фракции, которые используются для дальнейшей переработки и получения различных нефтехимических продуктов. Атмосферная перегонка, основная операция в атмосферном блоке, представляет собой процесс разделения нефти на фракции с помощью разницы в температурах кипения компонентов.

Современные технологии переработки нефти требуют точного и эффективного управления процессами в атмосферном блоке для обеспечения высокой производительности и каче-

ства продуктов. В этом контексте важным аспектом является создание математических моделей, способных описывать процессы переработки нефти с учетом всех факторов, влияющих на их протекание. Такие модели должны не только обеспечивать точность прогнозов, но и быть адаптированными к реальным условиям производства, где часто возникают неопределенности, вариации в составе нефти и внешние воздействия [1].

Технологические процессы первичной переработки нефти, как и другие процессы нефтепереработки, нефтехимии, металлургии и других производств, протекают в сложных химико-технологических системах, состоящих из разных блоков. Например, процессы первичной переработки нефти, которые протекают в технологическая схема атмосферного блока ЭЛОУ-АТ-2Атырауского НПЗ, состоит из блоков ЭЛОУ, АТ и газореагентного хозяйства [2].

Блок ЭЛОУ предназначен для проведения процессов обезвоживания и обессоливания сырой нефти на электродегидраторах. Блок атмосферной перегонки АТ на основе нагревания, испарения и фракционирования нефти обессоленной и обезвоженной нефти из блока ЭЛОУ, разделяет ее на отдельные фракции, а также проводит конденсации паров дистиллятов. Блок ГРХ предназначен для сбора, компаундирование и упорядоченная раздача топливных газов, для слива, хранения, приготовления растворов редкого натра необходимых концентраций и раздачи приготовленных растворов на технологические установки завода.

Выбор режима работы блока АТ в основном зависит от фракционного состава нефти, от содержания в ней бензиновых фракций и газов, а также от значения входных, режимных параметров основных агрегатов данного блока. К основным агрегатам блока АТ можно отнести ректификационную колонну отбензинивания нефти К-1 и атмосферную колонну К-2.

Для создания систему управления процессом первичной переработки и выбора эффективного режима работы блока АТ необходимо разработать взаимосвязанных математических моделей основных колонн блока, т.е. ректификационной колонны К-1иатмосферной колонныК-2. На практике разработка математических моделей этих колонн усложняется из-за дефицита и нечеткости необходимой исходной информации для создания моделей [3]. В производственных условиях определить фракционного состава перерабатываемой нефти, значения некоторых важных входных, режимных параметров указанных колонн, влияющие на их выходные параметры измерительными приборами очень сложно или невозможно.

На практике такими количественно трудно описываемыми объектами часто хорошо управляет эксперты, управляющие именно основе своего опыта, знания и интуиции. Их опыт, знания и интуиция, выраженная на естественном языке как нечеткая информация, на основе методов экспертных оценок, теорий нечетких множеств можно собрать, формализовать и использовать для описания режимов работы и разработки моделей объектов. В этой связи в настоящее время вопросы разработки адекватных моделей сложных, количественной трудно описываемых объектов, таких как К-1, К-2, характеризующие дефицитом и нечеткостью исходной информации является актуальной научно-практической проблемной. В данном исследовании для эффективного решения данной проблемы разработки моделей сложных объектов в условиях дефицита и нечеткости исходной информации проблем предлагается подход, основанные на использование доступной нечеткой и другой информации различного характера.

Обзор и анализ работ по теме исследования, посвященных к вопросам разработки моделей сложных, производственных объектов и технологических процессов. В исследовательских работах предложены различные подходы к разработке моделей и моделированию технологических объектов в различных условиях в т. ч. с использованием нечеткой информации. В частности, в исследованиях под руководством Кафарова В. [4] разработаны детерминированные модели основных процессов различных производств, протекающие в технологических агрега-

тах на основе теоретических сведений, кинетики процессов. В качестве преимуществ детерминированных моделей, предложенных в этих исследованиях типовых агрегатов и процессов различных производств, можно отметить их универсальность и теоретический обоснованность, так как они разработаны на основе фундаментальных законно в природы.

Недостатки этих исследований в том, что такие детерминированные модели для сложных технологических объектов, как исследуемые колонны К-1, К-2невозможно или очень сложна, разработка их становится экономически нецелесообразной. Это связана тем, что такие сложные объекты характеризуются дефицитом, и/или отсутсвие необходимых теоретических сведений для разработки детерминированных моделкей, они характеризуются нечеткостью исходной информации. При этом принятия различных допущений и идеализация условии работы сложных объектов для разработки детерминированных моделей при дефиците, нечеткости исходной информации приводят к получению не адекватных, не пригодных моделей для применения на практике.

Авторы работ [5] исследовали и предложили подходы к разработке моделей и управления на их основе объектами в условиях нечеткости некоторой части исходной информации, основанные на применение методов экспертной оценки и теорий нечетких множеств. Предложенные подходы к разработке моделей на основе множества уровня (α) позволяют разрабатывать нечеткие модели при четких значениях входных, режимных параметров и нечетких значениях выходных параметров объекта. Но в этих и других исследованиях разработки моделей на основе нечеткой информации не исследованы и не решены проблемы разработки моделей в условиях нечетких входных, режимных, и выходных параметров объекта. Кроме того, в анализированных и в других исследованиях по разработке моделей не исследованы проблемы разработки взаимосвязанных систем моделей технологических агрегатов, как колонны К-1 и К-2 атмосферному блоку, связанные через печи подогрева. Такая ситуация мотивировала данного исследования. Нами для решения проблем разработки систему моделей нечетко описываемых объектов применяется другой подход, основанные методы системного анализа, экспертных оценок и теорий нечетких множеств.

Материалы и методы. Объектом исследования является колонны К-1 и К-2 атмосферному блоку установки первичной переработки нефти ЭЛОУ-АВТ Атырауского НПЗ, которая характеризуется нечеткостью исходной информации. Материалами исследования являются технологические схемы, описание и технологический регламент работы атмосферного блока установки первичной переработки Атырауский НПЗ, а также статистические данные и нечеткая информация о состояние и его режимах его работы. На рисунке 1 приведена технологическая схема атмосферного блока, выделенная из общей схемы установки ЭЛОУ-АВТ2 Атырауского НПЗ.

Приведем описания процесса первичной переработки нефти в соответствие с приведенной технологической схемой. Сырая нефть подогревается и подается наблок обессоливания и электрообезвоживания (блок ЭЛОУ). Затем обессоленная нефть нагревается и подается в предварительный испаритель блока атмосферной перегонки, где частично отбензинивается. Нижний продукт (частично отбензиненная нефть) после нагрева в печи поступает в основную атмосферную колонну, где отбираются три боковые погона - керосиновый (фракция 180-220^{0}С), легкий дизельный (фракция 220-280^{0}С), тяжелый дизельный (фракция 280-350^{0}С). Нижний продукт (мазут), при неработающем вакуумном блоке, после охлаждения поступает в товарно-сырьевую базу для приготовления товарных мазутов [6].

При включенном вакуумном блоке мазут после подогрева поступает в вакуумную колонну и разделяется на следующие фракции: легкий вакуумный газойль; тяжелый вакуумный газойль; затемненный продукт гудрон. Верхние продукты колон К-1 и К-2 (бензиновая фракция НК-180^{0}С) смешиваются, отделяются от воды и частично от газов и подаются в стабилизационную

колонну. Верхний продукт этой колонны охлаждается и выводится с установки в виде конденсата и газа. Нижний продукт - стабильная бензиновая фракция НК-180^{0}С поступает на блок вторичной перегонки, где разделяется на узкие фракции (фр.62^{0}С, фр.62-105^{0}С, фр.105−140^{0}С, фр.140-180^{0}С) [7].

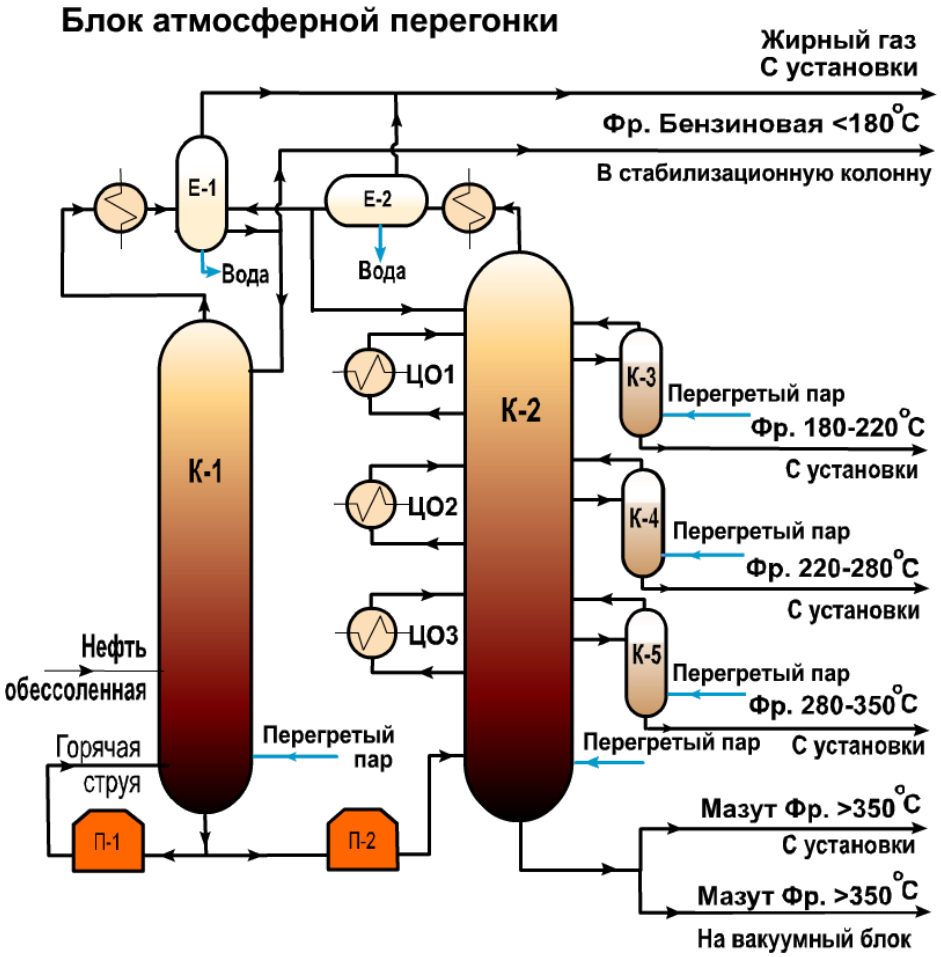


Рис.1 - Технологическая схема атмосферного блока ЭЛОУ-АТ-2

Системный метод разработки моделей является ключевым подходом к моделированию и анализу сложных объектов, особенно в условиях дефицита и неопределённости исходной информации. Этот метод позволяет создавать обоснованные и эффективные модели, которые помогают принимать решения в ситуациях, когда стандартные подходы неприменимы из-за неопределённости, нечёткости данных. Важно отметить, что такие модели могут включать статистические и нечеткие элементы, каждый из которых играет свою роль и имеет свои особенности в контексте обработки информации.

Разработка моделей для оценки объема бензина на выходе из атмосферного блока с учетом входных и режимных параметров на основе экспериментально-статистического подхода. Для разработки моделей взаимосвязанных колонн К-1 и К-2 используются различные методы, в том числе статистические подходы [8], методы системного анализа [9], экспертные оценки и теория нечетких множеств [10].

Предложенный метод включает в себя несколько основных этапов.

1) На основе системного анализа собрать и обработать доступную информацию статистиче-

ского $x_i,\ i = \overline{1, n_1}$ и нечеткого $\tilde{x}_i,\ i = \overline{n_1 + 1, n}$ характера о режимах работы взаимосвязанных объектов технологического комплекса, влияющие на выходные параметры, которые характеризуют качество работы объекта. Выходные параметры объекта также могут быть четкими $y_j,\ j = \overline{1, m_1}$ и нечеткими $\tilde{y}_j,\ j = \overline{m_1 + 1, m}$, оцениваемые экспертами.

2) Генерировать критериев $f_k,\ k = \overline{1, K}$ выбора эффективного типа моделей для каждого объекта технологического комплекса.

3) Для каждого объекта технологического комплекса на основе характера доступной исходной информации и критериев выбора $f_k,\ k = \overline{1, K}$ методами экспертной оценки определить эффективный тип разрабатываемой модели.

4) Синтезируются нечеткие модели для объекта с четкими входными и нечеткими выходными параметрами. Структуру нечетких моделей на основе идеи метода последовательного включения регрессоров можно идентифицировать в виде:

$$\tilde{y}_j = \tilde{a}_{0j} + \sum_{i=1}^{n_1} \tilde{a}_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{k=i}^{n_1} \tilde{a}_{ikj} x_{ij} x_{kj} + \ldots, \quad i = \overline{1, n_1},\ j = \overline{m_1 + 1, m}, \tag{1}$$

где $\tilde{a}_{0j}, \tilde{a}_{ikj}$ - неизвестные нечеткие параметры (регессионные коэффициенты), которых необходимо идентифицировать. Первая сумма состьавляет линейную часть нечетких моделей, последующие суммы - нелинейную часть.

5) Если модели удовлетворяют условиям адекватности, они могут быть рекомендованы для практического использования при оптимизации и управлении режимами работы объекта. В противном случае выявляются причины их неадекватности, и процесс возвращается на соответствующие этапы метода для устранения этих недостатков и обеспечения соответствия моделей реальным условиям.

6) Идентифицируются нечеткие параметры моделей (1). Предлагается следующий подход к идентификации нечетких параметров. Нечеткие модели на основе множества уровня α преобразуются в набор четких моделей:

$$y_j^{\alpha_l} = a_{0j}^{\alpha_l} + \sum_{i=1}^{n_1} a_{ij}^{\alpha_l} x_{ij} + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{k=i}^{n_1} a_{ikj}^{\alpha_l} x_{ij} x_{kj},\ l = \overline{1, L}, \tag{2}$$

где $\alpha_l,\ = \overline{1, L}$ - множество уровня(α).

Затем неизвестные значения параметров $a_{0j}^{\alpha_l}, a_{ij}^{\alpha_l},\ a_{ikj}^{\alpha_l}$ полученных четких моделей набор можно идентифицировать с помощью известных методов параметрической идентификации. После идентификации параметров модели (2) на α уровнях, например на основе метод наименьших квадратов, полученных значений параметров необходимо объединить по формуле [11]:

$$\tilde{a}_{ij} = \bigcup_{\alpha \in [0.5 \div 1]} a_{ij}^{\alpha_l} \quad \text{or} \quad \mu_{\tilde{a}_{ij}}(a_{ij}) = \sup_{\alpha \in [0.5, 1]} \min\{\alpha_l, \mu_{a_{ij}}^{\alpha_l}(a_{ij})\},$$
$$\text{где} \quad a_{ij}^{\alpha_l} = \left\{ a_{ij} \mid \mu_{\tilde{a}_{ij}}(a_{ij}) \geq \alpha \right\} \tag{3}$$

7) Проверяется адекватность разработанных моделей. При этом в качестве критериев адекватности можно выбрать:

$$R = \min \sum_{j=1}^{m} \left(y_j^M - y_j^E \right)^2 \leq R_D,$$

где y_j^M и y_j^E - соответственно модельные, рас-

считанные по моделей и реальные, полученные, например экспериментальным путем на объекте, значения выходным параметров; R_D - допустимое отклонение между y_j^M и y_j^R.

8) Если модели соответствуют условиям адекватности, их можно рекомендовать для практического применения в процессе оптимизации и управления режимами работы моделируемого объекта. В случае выявления неадекватности моделей проводится анализ причин этого несоответствия, после чего осуществляется возврат к соответствующим этапам метода для устранения проблем и обеспечения адекватности разрабатываемых моделей.

Обсуждение и результаты. На основе системного метода разработки статистических, нечетких моделей сложных объектов в условиях дефицита и неопределенности исходной информации, предложенного в предыдущем разделе, синтезированы модели колонн К-1 и К-2 для атмосферного блока установки первичной переработки нефти. В соответствии с пунктом 4 предложенного метода была определена структура статистической модели колонны К-1, которая описывает выход бензина фракции 180^0С и отбензиненной нефти, подаваемой в колонну К-2

$$y_j = a_{0j} + \sum_{i=1}^{3} a_{ij}x_i + \sum_{i=1}^{3}\sum_{k=i}^{3} a_{ikj}x_i x_k, \quad j = 1,2 \tag{4}$$

где y_1 -объем бензина фракции 180 °С, подаваемый на стабилизационной колонны,y_2 - объем отбензиновой нефти, подаваемой в К-2; x_i, $i = \overline{1,3}$ входные, режимные параметры К-1, x_1- объем сырья (обессоленной нефти), x_2- температура в К-1, x_3- давление в К-1.

После определения неизвестных параметров моделей (4) с использованием экспериментально-статистических данных и пакета программ REGRESS, в котором реализован метод наименьших квадратов, были получены модели для расчета объема выхода продуктов из колонны К-1:

$$y_1 = 11.1 + 0.008615385x_1 + 0.029473684x_2 - 1.555555556x_3 + 0.000026509x_1^2 + 0.000077562x_2^2 + 0.864197531x_3^2 \tag{5}$$

$$y_2 = 118.7 + 0.091384615x_1 + 0.312631579x_2 - 16.500000000x_3 + 0.000281183x_1^2 + 0.000822715x_2^2 + 9.166666667x_3^2. \tag{6}$$

В соответствии со структурой (1) предложенного системного метода идентифицирована следующая структура нечеткой модели, оценивающей конец кипения, бензина фракции «не выше», т.е.$\lesssim$180˚С:

$$\tilde{y}_3 = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 x_2 + \tilde{a}_2 x_3 + \tilde{a}_3 x_2^2 + \tilde{a}_4 x_3^2 \tag{7}$$

Продукт с низа колонны К-1, подогревается в печи П-2до необходимой температуры (360−385˚С) и подается в ректификационную колонну К-2 для разделения на другие фракции бензина и на мазут. Разработанные модели колонны К-2 на основе предложенного системного метода, определяющие объемы бензиновых фракций 180–220˚,220−280˚ и 280−350˚С, мазута фракции <350˚С имеют следующие структуры:

$$y_j = a_{0j} + \sum_{i=4}^{6} a_{ij}x_i + \sum_{i=4}^{6}\sum_{k=i}^{6} a_{ikj}x_i x_k, \quad j = \overline{4,7} \tag{8}$$

гдеy_4 - объем бензиновых фракций180-220˚С; y_5 - объем бензиновых фракций220-280˚С;y_6 - объем керосино-газойлевых фракций280-350˚С; y_7 - объем мазута фракции 350˚С; x_i, $i = \overline{4,6}$ - входные, режимные параметры К-2:x_4 - объем сырья (частично отбензиновая нефть из К-1); x_5 - температура в К-2; x_6 - давление в К-2.

После идентификации неизвестных параметров моделей (8) описанным выше способом с помощью программы REGRESS, получены следующие модели определения объема выхода продуктов из С-2 в зависимости от ее входных, ре-

жимных параметров:

$$y_4 = 11.2 + 0.00471381x_4 + 0.02709677x_5 - 1.4x_6 + 0.00003174x_4^2 + 0.000029136x_5^2 + 0.35x_6^2 \quad (9)$$

$$y_5 = 36 + 0.016835017x_4 + 0.0967741945 - 3.0x_6 + 0.000113367x_4^2 + 0.000104058x_5^2 + 1.25x_6^2 \quad (10)$$

$$y_6 = 4 + 0.001683502x_4 + 0.009677419x_5 - 0.5x_6 + 0.000011337x_4^2 + 0.000010406x_5^2 + 0.125x_6^2 \quad (11)$$

$$y_7 = 48 + 0.025252525x_4 + 0.145161290x_5 + 1.5x_6 + 0.000170051x_4^2 + 0.000156087x_5^2 + 1.875x_6^2 \quad (12)$$

Идентифицирована следующая структура нечетких моделей, позволяющий оценить качества бензиновых фракций и мазута из К-2:

$$\tilde{y}_j = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 x_5 + \tilde{a}_2 x_6 + \tilde{a}_3 x_5^2 + \tilde{a}_4 x_5 x_6 + \tilde{a}_5 x_6^2 \lesssim b_j, \quad j = \overline{8,11} \quad (13)$$

где $\tilde{y}_8, \tilde{y}_9, \tilde{y}_{10} и \tilde{y}_{11}$ - соответственно, бензиновые фракции с концами кипения $b_8 \widetilde{\leq} 200$, $b_9 \widetilde{\leq} 280$, $b_{10} \widetilde{\leq} 350^{\circ}C$ и мазут фракции началом кипения $b_{11} \widetilde{\geq} 350^{\circ}C$.

Затем аналогично для нечеткой модели (7) формуле (2) представлены набором четких моделей на множестве уровней α= {0.5;0.8;1} и с помощью программы REGRESS идентифицированы регрессионные коэффициенты полученных четких моделей на (α) уровнях. Параметры остальных нечетких моделей, оценивающие качества других бензиновых фракций и мазута идентифицированы аналогичным образом.

После объединения идентифицированных параметров на (α) уровнях по формуле (7) получены следующие модели для определения конца кипения бензиновых фракции с колонны К-2:

$$\tilde{y}_8 = 100.0 + 0.153846154x_5 + 30.00x_6 + 0.001183432x_5^2 \lesssim 200 \quad (14)$$

$$\tilde{y}_9 = 137.50 + 0.110x_5 + 41.250x_6 + 0.000440x_5^2 \lesssim 280 \quad (15)$$

$$\tilde{y}_{10} = 175 + 0.102941176x_5 + 52.50x_6 + 0.000302768x_5^2 \lesssim 350 \quad (16)$$

$$\tilde{y}_{11} = 175.0 + 0.106060606x_5 + 52.50x_6 + 0.000321396x_5^2 \gtrsim 350 \quad (17)$$

В полученных выше моделях колонн К-1, К-2 атмосферного блока установки первичной переработки нефти (9) - (8), (14)-(12) и (14)-(17) регрессоры, которые имеют нулевые коэффициенты, как не влияющие на выходные параметры пренебрежены и в указанных моделях не приведены. Результаты моделирования на основе разработанных и известных моделей для удобства анализа и сравнения занесены в таблицу 1.

Таблица 1 - Результаты моделирования процесса первичной переработки нефти с известными моделями [11] и разработанной системой различных моделей с использованием дополнительной нечеткой информации и экспериментальных реальных данных с блока АТ Атырауского НПЗ

Объемы и качественные показатели продуктов	**Известные модели [11]**	**Разработанные системы моделей**	**Реальные экспери-ментальные данные**
Объем бензина фракции 180°С с колонны С-1, y_1;	27,2	28,7	28
Объем от бензиновой нефти с колонны С-1, y_2;	299	297	297
Качество бензина фракции 180°С, $\tilde{y}_3$	–	175	$(178)^L$
Объем бензина фракции 180-220°С с колонны С-2, y_4;	27,2	28,3	27.8
Объем бензина фракции 220-280°С с колонны С-2, y_5;	100	100	100
Объем бензина фракции 280-350°С с колонны С-2, y_6;	10.3	10	10
Объем мазута с началом кипения 350°С с колонны С-2, y_7;	151	149.5	150
Качество бензина фракции 180-220°С, y_8;	–	200,3	$(210)^L$
Качество бензина фракции 220-280°С, y_9;	–	275	$(278)^L$
Качество бензина фракции 280-350°С, y_{10};	–	347	$(350)^L$
Качество мазута с началом кипения 350°С, $\tilde{y}_{11}$;	–	358	$(360)^L$
Качество бензина с выхода блока АТ, y_{12};	–	200	$(200)^L$
Значения входных, режимных параметров блока АТ x_1^* – объем сырья в К-1 (обессоленной нефти);	325.7	325.7	325.7
x_2^* – температура в К-1;	193	190	190
x_3^* – давление в К-1;	1,85	1,80	1,80
x_4^* – объем сырья в К-2;	297	297	297
x_5^* – температура в К-2;	312	310	311
x_6^* – давление в К-2;	2,10	2	2
x_7^* – содержание хлористых солей в сырье блока АТ	–	4	$(4)^L$
x_8^* – массовая доля серы в сырье блока АТ	–	0.75	$(0.75)^L$

Note: - означает, что данным методом эти параметры не определяются; $(\cdot^L)$ - эти параметры непосредственно не измеряются, оценивается в лаборатории с участием человека.

Выводы. Разработаны взаимосвязанные модели ректификационных колонн К-1 и К-2 атмосферному блоку установки первичной переработки нефти. Для определения объема нефтепродуктов на выходе атмосферного блока с помощью предложенного системного метода были созданы статистические нелинейные модели полиномиального типа (5) -(6), (9) - (12). Структура и параметры этих моделей были идентифицированы с использованием метода последовательного включения регрессоров и экспериментально-статистических данных с применением программы REGRESS, реализующей метод наименьших квадратов. Для оценки нечетких качественных показателей бензиновых фракций и мазута с атмосферного блока были разработаны нечеткие модели (8), (14) - (17). Структура этих моделей была определена на основе модификации метода последовательного включения регрессоров. Нечеткие параметры были идентифицированы путем преобразования нечетких моделей в наборы четких моделей

с использованием множества уровня (α) теории нечетких множеств, согласно формуле (2). Затем с помощью экспериментально-статистических данных и программы REGRESS были получены значения параметров для различных уровней α. Объединив эти идентифицированные значения параметров по формуле (3), были определены параметры моделей (8), (14) -(17).

Предлагаемый метод к разработке математических моделей основаан комплексное использование доступной информации различного характера, в т. ч. нечеткой информации, предситавляющей собой знания, опыт и соображения ЛПР, специалистов-экспертов по решаемой проблеме. Предлагаемый метод отличается от существующих детерминированных, статистияческих методов тем, что за счет использования доступной, в т.ч. нечеткой информации позволяет разрабатывать эффективные и высокоадекватные модели исследуемого объекта, функционирующих в условиях неопределенностью.

За счет комплексного использования доступной информации различного характера и гибридного подхода к разработке моделей сложного объекта производства предлагаемый системный метод имеет эффект синергизма и свойства эмердженности системы, которые является преимуществом предлагаемого метода разработки сложных объектов. А эффект синергизма и свойства эмердженности предлагаемого системного метода позволяет разработать эффективные и высокоадекватные модели для системного моделирования сложных производственных объектов, характеризующихся дефицитом и нечеткостью исходеной информации.

Проведем анализ и сравнения результатов моделирования работы атмосферного блока на основе известных моделей и разработанной системой различных моделей с использованием дополнительной нечеткой информации, приведенных в таблице 1, которые позволяет выделить следующие преимущества предложенного метода моделирования:

1. Предложенный метод моделирования, основанный на разработанной системе моделей с использованием нечеткой информации, позволяет увеличить объем более важных целевых фракций бензина за счет применения опыта, знаний и интуиции специалистов и экспертов. Как показано в результате сравнительного анализа (таблица 1), объем более важных бензиновых фракций 180^0С и 180–220^0С на выходе атмосферного блока увеличивается на 1,5 и 1,1 т/час, что соответствует росту на 5,51% и 4,04% соответственно, в то время как объемы менее важных продуктов уменьшаются.

2. Предложенныйметод за счет использования нечеткую информацию, представляющей собой опыт, знаня и интуцию ЛПРпозволяет определить нечетко описываемых качественных показателейпроизводимых целевых нефтепродуктов ($\tilde{y}_3$, $\tilde{y}_8, \tilde{y}_9, \tilde{y}_{10}, \tilde{y}_{11}, \tilde{y}_{12}$), которые не определяются известными методами. Как видно из результатов сравнения (таблица 1).

3. При моделировании на основе разработанных моделей при меньших значенияхтемпературыв и давления в К-1 и К-2 (x_2, x_3, x_5 $и x_5$)получены лучшие значения выходных целевых продуктов. Таким образом разработанные модели позволяет получить больше целевых продуктов при меньших энергозатрат, что обосновывает их преимущества перед известными детерминированными моделями.

Рассмотрим результаты критического анализа и возможных ограничений предлагаемого системного метода разработки моделей сложных производственных объектов, которые могут возникнуть при применении его на практике.

Предлагаемый системный метод разработки моделей сложных объектов в условиях неопределенности предполагает наличие ЛПР и специалистов экспертов по исследуемому объекту. В случае отсутствия таких ЛПР, специалистов-экспертов метод может оказаться неэффективным или непригодным для разработки эффективных моделей сложных, плохо формализуемых объектов в условиях неопределенности. Но для таких производственных объектов, как атмосферный блок установки первичной переработки нефти Атырауского НПЗ, функционирующих долгие годы, как правило, ЛПР и опытные специалисты, являющиеся экспертами по объекту

исследования, имеются.

Так как в предлагаемом системном методе проблемы неопределенности решаются в основном за счет экспертной информации, для результатов экспертной оценки практики ограничением к применению этого метода может быть субъективизм экспертной оценки. Кроме того, часто необходимо значительное время для обработки результатов экспертной оценки и достижения согласованности мнений экспертов. Для решения этих проблем предлагается модифицировать процедуры экспертизы, автоматизировать, реализовав ее в компьютерной сети с помощью соответствующей программы. При этом за счет автоматизации минимизируется время проведения экспертизы обеспечения достижения согласованных мнений экспертов, благодаря которой значительно снижается субъективизм экспертной оценки.

Литература

1. Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Управление атмосферной колонной малого нефтеперерабатывающего завода с применением динамической модели//Науковедение. - 2017. -Т.9(1). -С.1-13.

2. Кембаев А.Р. Табиғи мұнай және газды өңдеудегі жабдықтарды жөндеу// Алматы: TechSmith.2023. -276с . ISBN 978-601-352-777-2.

3. Fayaz M., Ahmad S., Ullah I., Kim D. A Blended Risk Index Modeling and Visualization Based on Hierarchical Fuzzy Logic for Water Supply Pipelines Assessment and Management//Processes. -2018. -Vol.6(5):61. DOI 10.3390/pr6050061.

4. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. основы стратегии: монография//Издательство Юрайт. -2026.-499с. ISBN 978-5-534-06991-4.

5. Orazbayev B.B, Ospanov Ye.A., Orazbayeva K.N, Makhatova V.E., Urazgaliyeva M.K., Shagayeva A.B. Development of mathematical models of R-1 reactor hydrotreatment unit using available information of various types// Journal of Physics: Conference Series 1399. -2019. -Vol.1399(4):044024. DOI 10.1088/1742-6596/1399/4/044024.

6. Гречухина А.А., Елпидинский А.А., Мингазов Р.Р., Плохова С.Е. Расчет ректификационных колонн установок перегонки нефти. Учебное пособие //Казанский национальный исследовательский технологический университет. -2017.-92 с. ISBN 978-5-7882-2138-0.

7. Власов В.Г. Подготовка и переработка нефтей. -2-е изд.// Инфра-Инженерия. -2026. -328 с. ISBN 978-5-9729-2808-8.

8. Orazbayev B., Ospanov Ye., Makhatova V., Salybek L., Abdugulova Z, Kulmagambetova Z., Suleimenova S., Orazbayeva K. Methods of Fuzzy Multi-Criteria Decision Making for Controlling the Operating Modes of the Stabilization Column of the Primary Oil-Refining Unit//Mathematics.-2023.-Vol.11(13): 2820. DOI 10.3390/math11132820.

9. Музипов Х.Н. Системы управления технологическими процессами добычи, промысловой подготовки и транспорта нефти и газа. Учебное пособие для вузов // Издательство Лань-Пресс. -2025. -268 с. ISBN 978-5-507-46261-2.

10. Anwar M.Z., Al-Kenani A.N., Bashir S., Shabir M. Pessimistic Multigranulation Rough Set of Intuitionistic Fuzzy Sets Based on Soft Relations//Mathematics. -2022. -Vol.10(5):685. DOI 10.3390/math10050685.

11. Меркулов В.В. Химическая технология. Переработка нефти и газа: Учебное пособие// Издательство Бастау. -2018. - 260 С. ISBN 978-601-7275-69-6.

References

1. Zatonskij A.V., Tugashova L.G. Upravlenie atmosfernoj kolonnoj malogo neftepererabatyvajushhego zavoda s primeneniem dinamicheskoj modeli//Naukovedenie. - 2017. -T.9(1). -S.1-13. [in Russian]

2. Kembaev A.R. Tabiғi mұnaj zhəne gazdy өңdeudegi zhabdyқtardy zhөndeu// Almaty: TechSmith.2023. -276c . ISBN 978-601-352-777-2.[in Kazakh]

3. Fayaz M., Ahmad S., Ullah I., Kim D. A Blended Risk Index Modeling and Visualization Based on Hierarchical Fuzzy Logic for Water Supply Pipelines Assessment and Management//Processes. -2018. -Vol.6(5):61. DOI 10.3390/pr6050061.

4. Kafarov V.V., Dorohov I.N. Sistemnyj analiz processov himicheskoj tehnologii. osnovy strategii: monografija//Izdatel' stvo Jurajt. -2026.-499c. ISBN 978-5-534-06991-4. [in Russian]

5. Orazbayev B.B, Ospanov Ye.A., Orazbayeva K.N, Makhatova V.E., Urazgaliyeva M.K., Shagayeva A.B. Development of mathematical models of R-1 reactor hydrotreatment unit using available information of various types// Journal of Physics: Conference Series 1399. -2019. -Vol.1399(4):044024. DOI 10.1088/1742-6596/1399/4/044024.

6. Grechuhina A.A., Elpidinskij A.A., Mingazov R.R., Plohova S.E. Raschet rektifikacionnyh kolonn ustanovok peregonki nefti. Uchebnoe posobie //Kazanskij nacional' nyj issledovatel' skij tehnologicheskij universitet. -2017.-92 c. ISBN 978-5-7882-2138-0. [in Russian]

7. Vlasov V.G. Podgotovka i pererabotka neftej. -2-e izd.// Infra-Inzhenerija. -2026. -328 s. ISBN 978-5-9729-2808-8. [in Russian]

8. Orazbayev B., Ospanov Ye., Makhatova V., Salybek L., Abdugulova Z, Kulmagambetova Z., Suleimenova S., Orazbayeva K. Methods of Fuzzy Multi-Criteria Decision Making for Controlling the Operating Modes of the Stabilization Column of the Primary Oil-Refining Unit//Mathematics.-2023.-Vol.11(13): 2820. DOI 10.3390/math11132820.

9. Muzipov H.N. Sistemy upravlenija tehnologicheskimi processami dobychi, promyslovoj podgotovki i transporta nefti i gaza. Uchebnoe posobie dlja vuzov // Izdatel' stvo Lan'-Press. -2025. -268 c. ISBN 978-5-507-46261-2. [in Russian]

10. Anwar M.Z., Al-Kenani A.N., Bashir S., Shabir M. Pessimistic Multigranulation Rough Set of Intuitionistic Fuzzy Sets Based on Soft Relations//Mathematics. -2022. -Vol.10(5):685. DOI 10.3390/math10050685.

11. Merkulov V.V. Himicheskaja tehnologija. Pererabotka nefti i gaza: Uchebnoe posobie// Izdatel' stvo Bastau. -2018. - 260 C. ISBN 978-601-7275-69-6. [in Russian]

Сведения об авторах

Оразбаев Б.Б. - д.т.н., профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, e-mail: batyr_o@mail.ru;

Кужуханова Ж.А. - старший преподаватель, Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана. Казахстан, e-mail: kuzhuhanova-zhad@mail.ru;

Ускенбаева Г.А. - ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана. Казахстан, e-mail: gulzhum_01@mail.ru;

Серимбетов Б.А. - ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана. Казахстан, e-mail: sba_rnmc@mail.ru;

Курмангазиева Л.Т. - к.т.н., ассоциированный профессор, Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, Астана, Казахстан, e-mail: kurmangazieval@mail.ru.

Information about the authors

Orazbaev B.B. - professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: batyr_o@mail.ru;

Kuzhuhanova Zh.A. - senior lecturer, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: kuzhuhanoa-zhad@mail.ru;

Uskenbayeva G.A. - associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: gulzhum_01@mail.ru;

Serimbetov B.A. - associate professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: sba_rnmc@mail.ru;

Kurmangaziyeva L.T. - associate professor, Kh.Dosmukhamedov Atyrau University, Astana, Kazakhstan, e-mail: kurmangazieval@mail.ru.

ҒТАМР 50.47.02 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1263**

ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗ АРХИТЕКТУРАСЫНДАҒЫ ДЕРЕКТЕР АҒЫНЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ: IIOT ХАТТАМАЛАРЫНЫҢ ӨНІМДІЛІГІ МЕН ҚАУІПСІЗДІГІН КЕШЕНДІ ТАЛДАУ

Г.А. Амирханова, Е. Фарузқызы, Б.С. Амирханов, А.А. Раева, Д.С. Жайсанова

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Корреспондент-автор: elnura.dauletkhan@gmail.com

Өндіріс циклін басқаруда цифрлық егіз технологиясын пайдалану компаниялар үшін тығыз желілерде жоғары жылдамдықты деректерді берумен байланысты қиындықтарға және қауіпсіздіктің жоғары деңгейін қамтамасыз ету қажеттілігіне байланысты өте маңызды. Бұл зерттеуде BME280 сенсорлары мен ESP32-S3 микроконтроллерін қамтитын архитектурадағы үш өнеркәсіптік интернет заттарының (IIoT) хаттамаларының (MQTT 5.0, WebSocket және HTTP/2) операциялық тиімділігі мен қауіпсіздік деңгейін терең бағалау ұсынылған. Зерттеу сонымен қатар деректерді беру үшін екілік хаттама буферлік кодтау форматын (Protobuf) пайдаланудың артықшылығы туралы объективті дәлелдер келтіреді. Бұл зерттеуде қолданылған әдіснама деректерді өткізу қабілетін, екі жақты сапар уақытын (RTT) және ресурстар жүктемесін кешенді бағалауды қамтыды. Қауіпсіздікті жақсарту үшін Transport Layer Security (TLS) 1.3 хаттамасының өңдеу уақытына және TLS өңдеу үшін аппараттық қауіпсіздік модульдерін (HSM) пайдалануға әсерін тексеру үшін эмпирикалық талдау жүргізілді. Сонымен қатар, желілік трафикті басқару үшін шеткі есептеу деңгейіндегі бейімделгіш сүзгілеу алгоритмдері пайдаланылды. Тәжірибелік нәтижелер MQTT 5.0 қазіргі уақытта басқа екі хаттамаға қарағанда төмен кідіріспен қамтамасыз ететінін, ал WebSocket веб-қосымшалардың тұрақтылығын қамтамасыз ететінін көрсетеді. Бұл зерттеудің негізгі ғылыми жаңалығы - Protobuf екілік деректер инкапсуляциясын пайдаланатын көп қабатты IIoT архитектурасын ұсыну. Дәстүрлі JSON-мен салыстырғанда, бұл деректер алмасу әдісі желі жүктемесін 67,06%-ға немесе одан да көпке азайтып, желінің кибершабуылдарға төзімділігін жақсарта алады. Бұл зерттеудің нәтижелері интеллектуалды және нақты уақыт режимінде жүйені бақылауға қабілетті кәсіпорынның сандық модельдерін жобалау үшін стратегиялық негіз болып табылады.

Түйін сөздер: цифрлық егіз, IIoT хаттамалары, MQTT 5.0,WebSocket, Protobuf, TLS 1.3, Edge Computing, индустрия 4.0.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТОКА ДАННЫХ В АРХИТЕКТУРЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОТОКОЛОВ IIOT

Г.А. Амирханова, Е. Фарузкызы, Б.С. Амирханов, А.А Раева, Д.С Жайсанова

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
e-mail: elnura.dauletkhan@gmail.com

Использование технологии цифровых двойников в управлении производственным циклом имеет жизненно важное значение для компаний из-за проблем, связанных с передачей данных с высокой скоростью в плотные сети, и необходимости обеспечения высокого уровня безопасности. В данном исследовании представлена углубленная оценка операционной эффективности и уровня безопасности трех протоколов промышленного интернета вещей (IIoT) (MQTT 5.0, WebSocket и HTTP/2) в архитектуре, включающей датчики BME280 и микроконтроллер ESP32-S3. Исследование также предоставляет объективные доказательства предпочтительного использования двоичного формата кодирования протокольных буферов (Protobuf) для передачи данных. Методология, использованная в данном исследовании, представляла собой полную оценку пропускной способности данных, времени кругового пути (RTT) и нагрузки на ресурсы. Для повышения уровня безопасности был проведен эмпирический анализ для проверки влияния протокола Transport Layer Security

(TLS) 1.3 на время обработки и влияния использования аппаратных модулей безопасности (HSM) для обработки TLS. Кроме того, для управления сетевым трафиком использовались адаптивные алгоритмы фильтрации на уровне граничных вычислений. Экспериментальные результаты показывают, что MQTT 5.0 в настоящее время обеспечивает меньшую задержку, чем два других протокола, а WebSocket обеспечивает стабильность для веб-приложений. Основная научная инновация этого исследования — предложение многоуровневой архитектуры IIoT с использованием бинарной инкапсуляции данных Protobuf. По сравнению с традиционным JSON, использование этого метода обмена данными может снизить нагрузку на сеть на 67,06% и более и повысить устойчивость сети к кибератакам. Результаты этого исследования обеспечивают стратегическую основу для проектирования корпоративных цифровых моделей, которые являются «умными» и способны обеспечивать мониторинг систем в реальном времени.

Ключевые слова: цифровой двойник, протоколы IioT, MQTT 5.0, WebSocket, Protobuf, TLS 1.3, Edge Computing (граничные вычисления), индустрия 4.0.

OPTIMIZATION OF DATA FLOW IN DIGITAL TWIN ARCHITECTURE: A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF PERFORMANCE AND SECURITY OF IIOT PROTOCOLS

G.A. Amirkhanova, Y. Faruzkyzy✉, B.S. Amirkhanov, A.A. Rayeva, D.S. Zhaissanova

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: elnura.dauletkhan@gmail.com

It is vital for companies to use Digital Twin technology in the management of their production cycle due to challenges of data being transferred at high rates into dense networks and the need for high levels of security. This research presents an in-depth evaluation of the operational efficiency and level of security of three industrial internet of things (IIoT) protocols (MQTT 5.0, WebSocket, and HTTP/2) within an architecture incorporating BME280 sensors and ESP32-S3 microcontroller. The study also provides objective evidence for the preferred use of the protocol buffers (Protobuf) binary encoding format for transmitting data.The methodology utilized in this research was a complete assessment of data throughput, round-trip time (RTT), and resource load. In order to increase the level of security, an empirical analysis was performed to test the effect of Transport Layer Security (TLS) 1.3 with regard to processing time and the impact of the use of Hardware Security Modules (HSM) to process TLS. Additionally, adaptive filtering algorithms at the Edge Computing level were employed to control network traffic.The experimental results demonstrate that MQTT 5.0 currently produces less latency than the other two protocols, while WebSocket provides stability for web applications. The primary scientific innovation of this study is the proposition of a multi-level IIoT architecture utilizing Protobuf binary data encapsulation. When compared to traditional JSON, the use of this method of data exchange can reduce network load by 67.06 percent or more and increase network resilience against cyberattacks. The results of this study provide a strategic foundation for the design of enterprise digital models that are ”smart” and capable of providing real-time monitoring of systems.

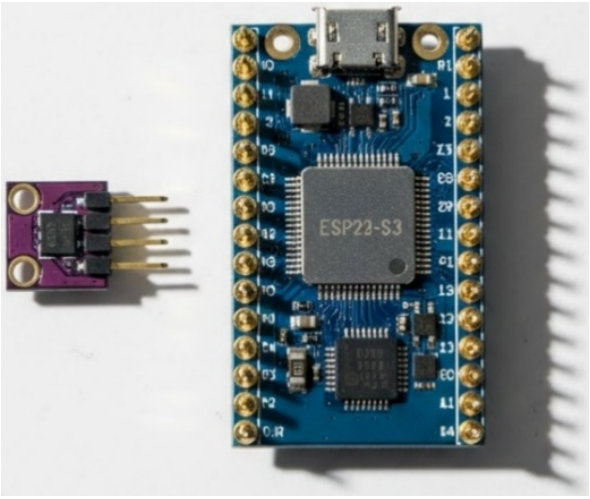
Keywords: digital twin, IIoT protocols, MQTT 5.0, WebSocket, Protobuf, TLS 1.3, Edge Computing, industry 4.0.

Кіріспе. Қазіргі уақытта әлемдік бизнес секторы «Индустрия 4.0» парадигмасынан туындаған елеулі техникалық реформалық өзгерістерді бастан кешіруде. Бұл трансформацияның негізгі компоненттерінің бірі - материалдық активтердің динамикалық виртуалды көрінісін жасайтын сандық егіздер. Сандық егіздер тек визуалды көрініс үшін ғана емес, сонымен қатар активтердің болашақ болжамдарын әзірлеу, активпен не болғанын тез тіркеу және технологияның үздіксіз жұмыс істеу тәсілін жақсартуға көмектесу үшін толық интеллектуалды негіз болып та-

былады.

Дегенмен, сандық егіздердің функционалдығы физикалық объект пен оның виртуалды көрінісі арасындағы ақпараттың жылдам және дәл берілуіне айтарлықтай байланысты. Қазіргі заманғы зауыттарда мыңдаған сенсорлық түйіндер айтарлықтай көлемде деректер жасайды, бұл желілік инфрақұрылымға жүктеме түсіреді, кідіріс уақытын арттырады және деректер қауіпсіздігін төмендетеді. Сондықтан, тиісті байланыс хаттамаларын таңдау және деректерді сериялау форматтарын оңтайландыру Заттар өнеркәсіптік интернеті (IIoT) саласында зерттеу және қолданба тұрғысынан маңызды бола түсуде.

Зерттеудің мақсаты мен жаңалығы. Бұл зерттеудің мақсаты - ресурстармен шектелген сандық егіздердің өнеркәсіптік интернет заттары (IIoT) құрылғылары үшін оңтайлы деректер ағынының архитектурасын анықтау. Жобада IIoT құрылғыларынан телеметрияны қабылдау үшін аппараттық құрал ретінде ESP32-S3 микроконтроллері және BME280 сенсоры қолданылады. Бұл зерттеу құрылымдық деректерді сериялауға арналған екілік формат Protobuf-тың дәстүрлі түрде қолданылатын JSON форматымен салыстырғанда артықшылықтарын көрсетеді, бұл дәстүрлі телеметрия деректерін жіберу әдістерімен салыстырғанда пайдалы жүктеме көлемін айтарлықтай азайтады.



1-сурет. BME280 сандық сенсоры және ESP32-S3 микроконтроллері

Зерттеу үшін таңдалған аппараттық жүйе (1-сурет) нақты уақыт режиміндегі деректерді жинауға және өңдеуге арналған. Қоршаған орта температурасын, ылғалдылығын және атмосфералық қысымды жоғары дәлдікпен өлшеу үшін BME280 сенсоры қолданылады. ESP32-S3 микроконтроллері жиналған деректерді MQTT 5.0 немесе WebSocket арқылы сандық егіздердің виртуалды моделіне жібермес бұрын TLS 1.3 хаттамасын пайдаланып шифрлайды.

Осы мақалада ұсынылған қосымша ғылыми инновация ретінде шеткі есептеу деңгейінде шекті бейімделгіш сүзгілеу әдісі әзірленді. Protobuf форматымен біріктірілген бұл әдіс өлшенген уақыт параметрлеріндегі физикалық маңызды ауытқуларды (шу деңгейінен тыс ауытқулар) ғана жіберу арқылы құрылғылар арасындағы желілік трафикті оңтайландырудың жаңа тәсілін ұсынады.

Эксперименттік аппараттық кешен. Әдеттегі өндірістік орталардың дәлірек көрінісін алу үшін біз осы зерттеуге әртүрлі аппараттық қабаттарды біріктірдік. Біздің жүйеміз қоршаған орта температурасын, ылғалдылығын және атмосфералық қысымды жоғары дәлдікпен және 20 биттік ажыратымдылықпен өлшейтін BME280 сенсорлық модульдеріне негізделген. Шикі деректерді өңдеу және жүйелі басқару үшін Ryzen 5 процессоры мен Ubuntu 22.04 LTS операциялық жүйесіне негізделген жоғары өнімді сервер инфрақұрылымын пайдаланумен қатар, біз бұл серверді деректер ағынын оңтайландыру және шеткі есептеу деңгейінде деректерді алдын ала сүзу үшін Mosquitto брокері ретінде де пайдаландық.

Салыстырмалы хаттамалар талдау. Үш негізгі ақпарат алмасу әдісін терең зерттеу жүргізілді, оны кейіннен әртүрлі сандық егіз пайдалану жағдайлары мен қолданбаларына экстраполяциялауға болады. Деректер пакетінің құрылымында қолданылатын жеңіл тақырыптардың тиімділігін және салалық стандартты MQTT 5.0 хаттамасының қызмет көрсету сапасын (QoS) бағалау үшін бірнеше талдау жүргізілді. Талдау сонымен қатар WebSocket хаттамасының нақты уақыт режиміндегі 3D визуализация интерфей-

стері мен басқару тақталарын әзірлеуге көмектесетін толық дуплексті байланысты қамтамасыз ету әлеуетін көрсетті. Сонымен қатар, REST API арқылы бұлттық сақтау орнына жіберілетін үлкен деректер жиынтығын (көптеген деректерді жинау) мерзімді синхрондаумен байланысты мультиплекстеу мүмкіндіктері мен ресурстардың тиімділігіне аналитикалық бағалау жүргізілді.

Әдебиеттерге шолу. Тізімнің [1] жұмысында өндірісте цифрлық егіздерді әзірлеу мен пайдаланудағы қазіргі үрдістер мен заманауи жағдайдың егжей-тегжейлі сипаттамасы берілген. Интернет арқылы сенімді деректерді беру үшін TCP басым әдіс болып қала береді [2], ал WebSocket нақты уақыт режиміндегі вебинтерфейстер үшін барған сайын танымал бола бастады [3].

MQTT 5.0 нұсқасы ресурстары шектеулі құрылғыларды қосу үшін стандартты таңдау болып қала береді [4] және Мишра мен Кертестің зерттеулеріне сәйкес, басқа хаттамаларға қарағанда энергияны тиімдірек пайдаланады [5]. Қауіпсіздік тұрғысынан TLS 1.3 қазір деректерді қорғаудың жаңа стандарты болып табылады, ескірген TLS-тің бұрынғы нұсқаларын ауыстырады [6].

Заттардың өнеркәсіптік интернетінде (IIoT) әртүрлі деректерді беру әдістерінің кідірісін зерттеген Сильва және т.б. зерттеуі MQTT HTTP-ге қарағанда жақсы жауап беру уақытына ие екенін анықтады [7]. Дегенмен, Лакшминараян атап өткендей, MQTT хаттамасының қызмет көрсетуден бас тарту (DoS) шабуылдарына осалдығы мұндай шабуылдардан қорғану үшін қосымша шифрлау әдістерін қажет етеді [8]. Сандық егіздер арасындағы нақты уақыт режиміндегі синхрондаудың мысалдары Чо мен Ноның [9] еңбегінде келтірілген.

Жақында іске қосылған maketwin платформасы сандық егіз архитектураның икемділігін қамтамасыз етеді [10] және Wi-Fi арнасының (CSI) күй деректері мен машиналық оқыту технологиялары арқылы нысандарды бақылаудың жаңа әдістерін енгізеді [11]. Gao командасы цифрлық егіздердің кеңсе жиһаздарын басқаруға қаншалықты көмектесетінін көрсеткенімен [12], Скворц WebSockets дуплексті арналар арқылы деректерді қаншалықты жылдам бөлісе алатынын бағалады [13]. Михович әртүрлі хаттамалардың тиімділік коэффициентін бағалау әдісін ұсынады [14]; жақында бұл IoT құрылғыларын сайтаралық сценарийлерден (XSS) және SQL инъекциялық шабуылдардан қалай қорғауға болатынына ғылыми назар аударуды тудырды [15].

OPC UA (open Platform Communications Unified Architecture) ХАТТАМАСЫ ”Индустрия 4.0” компанияларында ақпараттық модельдеу үшін стандарт ретінде кеңінен қолданылады. OPC UA-ның MQTT-тен артықшылығы-оның сандық егіздегі ақпараттың семантикалық маңызды сипаттамаларын және оның басқа сандық егіздермен байланысын қамтамасыз ету мүмкіндігі. Бұл зерттеу OPC UA және Protobuf интеграциясы арқылы күрделі өнеркәсіптік жүйелердің цифрлық егіздерін масштабтау мүмкіндігін қарастырады.

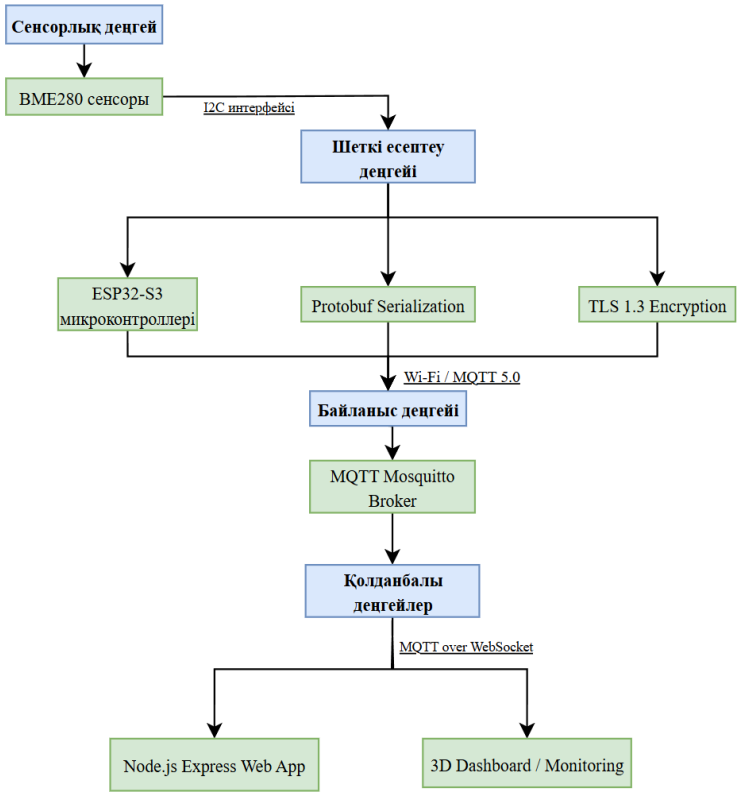
Деректерді берудің ең жақсы әдісін таңдау өткізу қабілеттілігін арттыруға айтарлықтай әсер етеді. Өткізу қабілеті төмен өнеркәсіптік Заттар интернеті (IIoT) желілерінде Google протоколдық буферлері (Protobuf) сияқты екілік әдістер JSON сияқты дәстүрлі мәтіндік деректер форматтарымен салыстырғанда тасымалданатын деректердің көлемін азайтады. Чо Мен Но MQTT хабар алмасу протоколын қолдана отырып, нақты уақыттағы синхрондау зауытының цифрлық егізін жасау мүмкін екенін көрсетті.

Материалдар мен әдістер. Зертханалық қондырғы деректерді беру үшін digital twin (TSE) архитектурасының тиімділігін арттыру және арттыру мақсатында жасалған. Деректерді беру/цифрлық егізді құру процесінің барлық бөліктері қамтылған. Жүйенің жалпы мақсаты-заманауи TLS v.1.3 шифрлау протоколының көмегімен өндірістік деректерді жылдам және қауіпсіз алу.

Бұл зерттеу жобасының архитектурасында төрт архитектуралық деңгей бар. Барлық төрт деңгей өз функцияларын орындау арқылы деректердің тұтастығы мен қауіпсіздігін сақтауға

көмектеседі.

Бірінші деңгей-сенсорлық деңгей; екіншісі - жетілдірілген есептеу (edge); үшіншісі - қолданбалы бағдарламалау интерфейсі (API) және осы зерттеуде қолданылатын бұлтты шешімдер. Сенсор деңгейінде қоршаған ортаның келесі параметрлерін оқитын аппараттық модуль бар: температура, ылғалдылық және қысым; және 20 биттік ажыратымдылықпен осы өлшенген параметрлердің сәйкес сандық көрінісін қамтамасыз етеді. Сенсорлық қабаттың негізгі элементі-Bosch Sensortec (Германия) шығарған BME280 сандық сенсорлық модулі.



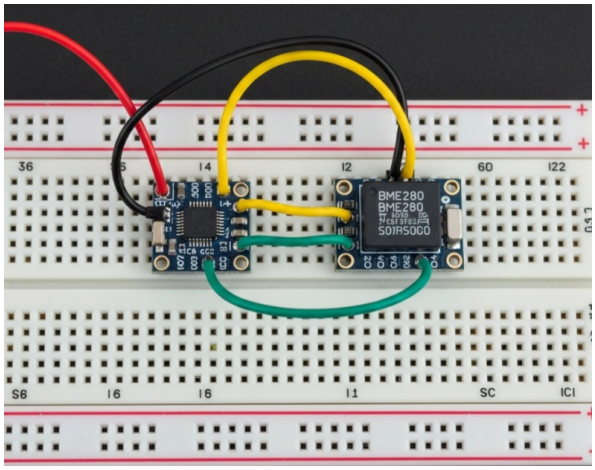
2-сурет. Цифрлық егіз жүйесінің деңгейлі архитектурасы

Перифериялық есептеу деңгейі негізінен 240 МГц жиілікте жұмыс істейтін екі ядросы және бір Xtensa® LX7 бар ESP32 – S3 микроконтроллерінен тұрады. Шекаралық есептеу деңгейінде деректерді сериялау протокол буферлерінің көмегімен өңделеді (Protobuf форматы), ал деректерді шифрлау TLS 1.3 стандартына сәйкес жүзеге асырылады. AES-256 және RSA аппараттық үдеткіштерін пайдаланып деректерді шифрлау процесі TLS 1.3 стандартында 0-RTT (Zero Round Trip time Recovernment) шифрлау протоколдарын пайдалану арқылы шифрланған деректердің жалпы уақыт кідірісін (кідірісін) азайтады.0-RTT шифрлауды пайдалану бастапқы құрылғы өшірілген уақыт ішінде ”байланысты растау” процесін орындамай-ақ, олар алынған құрылғыға деректерді лезде жіберуді қамтамасыз етеді.

Деректерді беру әдісі Wi-Fi желілері арқылы MQTT 5.0 протоколы арқылы жүзеге асырылады және MQTT хабарламалары Mosquitto дерекқоры арқылы және оған кіретін Edge шлюзінде орналасқан Mosquitto брокерімен басқарылады. Соңғы түйін немесе қосымша-бұл Node JS Түйінінің веб-қосымшасы және WebSocket арқылы MQTT арқылы нақты уақыт режимінде деректерді визуализациялауға арналған 3D веб-бақылау тақтасы.

1-кесте. Экспериментте қолданылған аппараттық құралдардың толық сипаттамасы

Құрылғы	Моделі	Техникалық мүмкіндіктері мен зерттеудегі рөлі
Сенсор	BME280	Температураны (±0.5°C), ылғалдылықты (±3%) және қысымды (±1 hPa) өлшеуге арналған кешенді модуль.
Контроллер	ESP32-S3	Деректерді жинауға, сериялауға және аппараттық деңгейде шифрлауға жауапты негізгі есептеуіш блок.
Шеткі шлюз	Ryzen 5 3550H / Ubuntu	16 ГБ жедел жады бар сервер. Ол MQTT брокері ретінде қызмет етеді және деректерді алдын ала терең өңдеуді орындайды.
Роутер	Mi Wi-Fi Router 4A	Жергілікті желі ішіндегі байланыс тұрақтылығын және деректер тасымалдау жылдамдығын қамтамасыз етеді.



3-сурет. BME280 сенсоры мен ESP32-S3 контроллерінің қосылу схемасы

Эксперименттің аппараттық параметрлері төмендегі суретте көрсетілген. ESP32-S3 BME280-ге I2C интерфейсін (SDA және SCL сызықтары) қолдана отырып, тақтада қосылды. Жоғарыдағы схема бастапқы деңгейдегі деректерді алудың және бастапқы деректерді кибершабуылдардан қорғаудың маңыздылығын көрсетеді. Ryzen 5 процессоры және Ubuntu 22.04 LTS операциялық жүйесі перифериялық шлюз ретінде пайдаланылады, сонымен қатар жүйенің жалпы архитектурасының тұрақтылығын қамтамасыз етуге көмектеседі. Осы параметрді қолдана отырып, жүйе өндіріс жағдайында нақты уақыт режимінде физикалық параметрлердің стандартты мәндерінен кез-келген ауытқуларды тез анықтай алады және алынған деректерді виртуалды әлемге қауіпсіз жібере алады. Бұл процесс деректерді өңдеудің жалпы тиімділігін арттырып қана қоймайды, сонымен қатар маңызды салалардағы өнеркәсіптік ақпараттық қауіпсіздіктің барлық қатаң стандарттарына сәйкес келеді.

Деректерді Protobuf арқылы оңтайландыру. Google деректерді өңдеуді тездету және желі арқылы жіберілетін ақпарат көлемін азайту үшін екілік протоколдық буферлерді (Protobuf) пайдаланатын деректерді сериялаудың жаңа әдісін жасап шығарды. Protobuf тек өңдеуді жеделдетуге және есептеу қуатына деген қажеттілікті азайтуға көмектесіп қана қоймайды; ол деректерге қатысты нақты анықталған типтер жүйесіне ие, ал JSON форматында мұндай айқын типтер жүйесі жоқ.

Сонымен қатар, Protobuf файлы жоғарыда аталған сенсор деректерінің қалай ұсынылатынын егжей-тегжейлі сипаттайтын proto деректер құрылымын анықтау үшін қолданылады. Төменде Protobuf синтаксисін пайдалана отырып, сенсор хабарламасының құрылымы proto файлында қалай анықталатынына мысал келтірілген:

```
Protocol Buffers
syntax = "proto3";

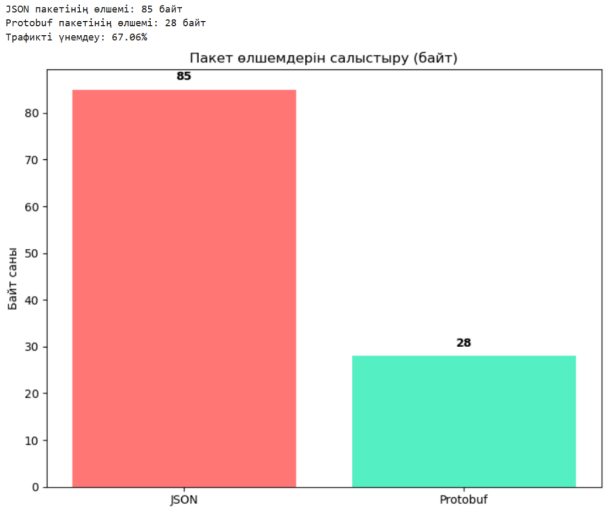
message SensorData {
```

```
  float temperature = 1; // 4 байт
  float humidity    = 2; // 4 байт
  float pressure    = 3; // 4 байт
  int64 timestamp   = 4; // 8 байт
}
```

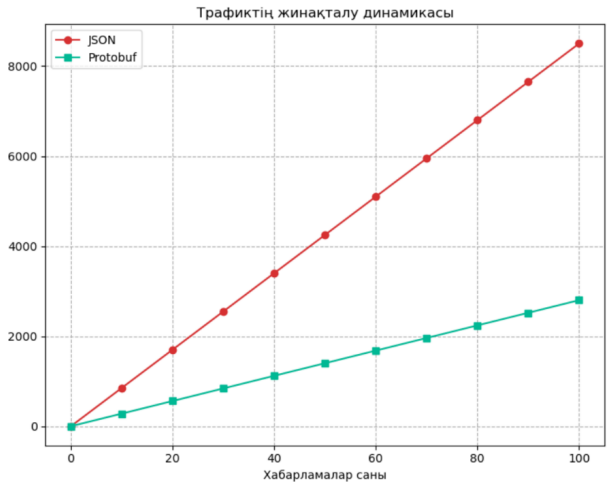
Жоғарыдағы деректер типтерінің әрқайсысы үшін қажетті байт санын пайдалану сол деректерді сақтауға қажетті ең аз орынды (яғни ұзындығын) анықтауға, сондай-ақ құрылым ішіндегі әрбір өріске бірегей сандық тег беруге мүмкіндік береді. Мұндай тегтеу әдісі екілік кодпен жазылған хабарламада деректердің аз мөлшерін сақтауға жағдай жасайды.Пайдалы жүктеменің (payload) қаншалықты тиімді екенін бағалау үшін келесі формула қолданылды:

$$S_{reduction} = \frac{Size_{JSON} - Size_{Protobuf}}{Size_{JSON}} \times 100\% \quad (1)$$

Астынғы бөлікте көрсетілген диаграммада пакет өлшемінің төмендегені көрсетілген. Бұл көрсеткіш жүйенің өткізу қабілетіне тікелей әсер етеді:



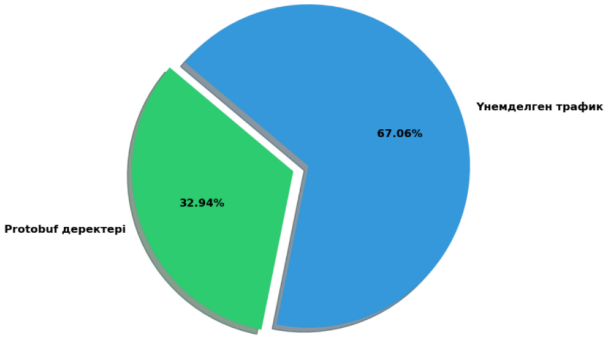
4-сурет. Деректер пакетінің өлшемін салыстыру (JSON vs Protobuf)



5-сурет. Хабарламалар санына байланысты жиынтық трафиктің өсу динамикасы

JSON пакетінде бірдей деректерді (температура, ылғалдылық және қысым) жіберу үшін орташа өлшемі 80-120 байт қажет. Протокол буферлерінің (Protobuf) пішімін пайдалану арқылы бұл шамамен 20-30 байтқа дейін азаяды. Бұл шамамен 67,06% төмендеуді көрсетеді.

Бұл график уақыт өте келе жіберілетін хабарламалар көлеміне байланысты жиынтық трафиктің өсуін көрсетеді. Атап айтқанда, нәтижелер JSON (қызыл сызық) мәтіндік деректер көлемінің экспоненциалды өсуіне әкелетінін және protobuf (жасыл сызық) протоколы жалпы жүктемені төмендететінін желіде көрсетеді. Тәжірибе нәтижелері деректерді беру үшін protobuf пішімін пайдалану трафиктің 67,06% қысқаруына әкелуі мүмкін деген қорытындыны қолдайды, бұл өткізу қабілеті шектеулі IIoT жүйелерінің тиімділігін арттыру және цифрлық егіз технологияларды енгізу үшін өте маңызды.



6-сурет. Protobuf қолдану арқылы трафикті үнемдеу тиімділігі

Талдау көрсеткендей, Protobuf қолданған кезде желілік трафиктің максималды көлемін 67,06%- ға төмендетуге болады. Бұл нәтиже өткізу қабілеті шектеулі өндірістік желілер үшін, сондай-ақ нақты уақыт режимінде деректерді беруді қажет ететін ”сандық егіз” жүйелер үшін өте маңызды.

Сонымен қатар, екілік форматқа көшу трафикті азайтып қана қоймайды, сонымен қатар ESP32-S3 микроконтроллерінің қуат тұтынуына оң әсер етеді. Пайдалы жүктеменің азаюы оның мөлшерінің 3 есе азаюына әкеледі, бұл Wi-Fi модулінің қуат тұтынуының шамамен 30-40% төмендейді. Мұндай энергияны үнемдеуге радионың белсенді тарату режимінде өткізетін уақытын қысқарту арқылы қол жеткізіледі. Пайдалы жүктеме көлемінің едәуір азаюына (67,06%-ға) байланысты ESP32-S3 деректерді тезірек эфирге жібере алады, бұл оған қысқа уақыт ішінде төмен қуат режиміне ауысуға мүмкіндік береді. Бұл әдістеме ”физикалық объект пен виртуалды модель” арасындағы деректер ағынын оңтайландыруға және жүйенің жалпы өнімділігін арттыруға мүмкіндік берді.

Хаттамаларды конфигурациялау және байланыс модельдері. Digital Twin жүйесіндегі ақпарат алмасудың сенімділігін жан-жақты зерттеу үшін деректер ағынының ерекшеліктеріне бейімделген үш негізгі IIoT хаттамасы арнайы экспериментттік кезеңде сыналды. Жүйенің негізгі байланыс әдісі ретінде MQTT 5.0 (TCP арқылы) таңдалды.

Ол Mosquitto брокерін пайдаланып конфигурацияланды және QoS 1 деңгейімен жабдықталды, бұл қосылымның тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін әрбір пакеттің шлюзге жеткізілуін кепілдендірді. Сонымен қатар, жаңартылған хаттама мүмкіндіктері деректер тақырыбына метаақпарат қосу арқылы жүйенің архитектуралық икемділігін айтарлықтай арттырды. Нақты уақыттағы визуализация деңгейінде RFC 6455 стандартына сәйкес келетін WebSocket технологиясы пайдаланылды, бұл шеткі есептеу шлюзі мен 3D басқару тақтасы арасында тұрақты, екі жақты (толық дуплексті) байланыс арнасын жасады, бұл төмен кідіріспен қамтамасыз етті. Жүйелік файлдарды және күрделі Protobuf схемаларын мезгіл-мезгіл синхрондау міндеті HTTP/2 хаттамасына жүктелді, бұл мультиплекстеу мүмкіндіктерінің арқасында желілік ресурстарды тиімді пайдалануға мүмкіндік берді. Байланыс модельдерін орнату кезінде ESP32-S3 микроконтроллері мен Edge Gateway арасындағы киберқауіпсіздік мәселелеріне ерекше назар аударылды және барлық ақпараттық транзакциялар TLS 1.3 хаттамасын пайдаланып шифрланды, ал аппараттық үдеткіштерді пайдалану жоғары есептеу жылдамдығы мен жалпы өнімділікті қамтамасыз етті.

Digital Twin жүйесінде ақпарат алмасудың тиімділігін бағалау үшін жүргізілген эксперименттік зерттеулердің нәтижелері 7-суретте көрсетілген. Графиктерді талдау негізінде келесі қорытындылар жасалды:

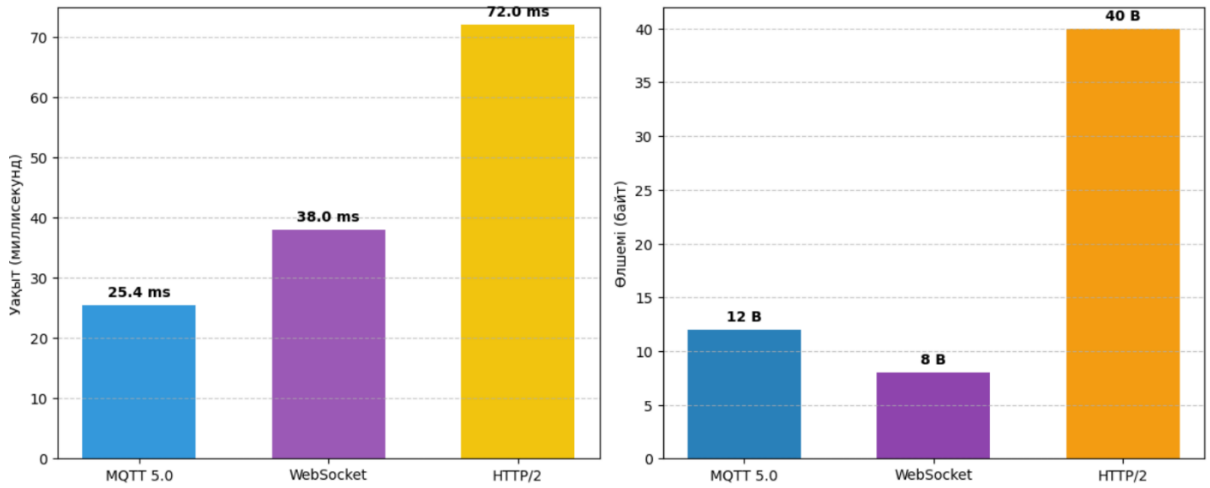
а) Кідірісті талдау: эксперименттік зерттеулердің нәтижесінде MQTT 5 протоколы үшін ең төменгі орташа кідіріс белгіленді (25,4 мс). Бұл оның нақты уақытқа мүмкіндігінше жақын жұмыс істеу қабілетін дәлелдейді. Сонымен қатар, WebSocket протоколы 38 мс нәтиже көрсет-

ті. Бұл көрсеткіш оның толық дуплексті сипатына (тұрақты екі жақты байланыс) және қайта қосылуға кететін уақыттың болмауына байланысты. HTTP / 2 протоколы сұраныс-жауап моделінің күрделілігіне байланысты ең жоғары кідіріске (72 мс) ие болды.

b) Желілік шығындар: WebSocket деректер пакетінің тақырыбы мен үстеме шығындар (8 байт) тұрғысынан ең үнемді хаттама ретінде танылды. MQTT 5.0 12 байттық өткізу қабілеттілігін қамтамасыз ету арқылы желілік ресурстарды пайдалану тиімділігін көрсетті, бұл әсіресе өткізу қабілеті төмен IIoT желілері үшін маңызды. HTTP / 2 протоколы мәтіндік тақырыптарды қолдануға байланысты (тіпті қысылған) ең жоғары мәнге ие (40 байт).

2-кесте. IIoT байланыс хаттамаларының өнімділік көрсеткіштерін салыстырмалы талдау

Параметрлер	MQTT 5.0 (over TCP)	WebSocket (Full-Duplex)	HTTP/2 (REST)
Орташа кідіріс (Latency)	25,4 мс	38 мс	72 мс
Желілік шығын (Overhead)	12 байт	8 байт	40 байт
Тұрақтылық (Jitter)	Жоғары (±50.2 мс)	Төмен (±25.5 мс)	Өте жоғары (±75.8 мс)
Қолданылуы	Сенсорлық деректерді жинау	3D Dashboard/Визуализация	Мерзімді синхрондау



7-сурет. IIoT хаттамаларының (MQTT 5.0, WebSocket, HTTP/2) орташа кідіріс уақыты (Latency) мен желілік артық шығындарын (Overhead) салыстырмалы талдау

Талдау нәтижелері WebSocket және MQTT протоколдары нақты уақыт режимінде ”цифрлық егіздерді” 3D визуализациялау және бақылау үшін ең оңтайлы шешімдер екенін көрсетеді.

WebSocket ең жоғары жылдамдықты ұсынса, MQTT 5 ең жоғары жылдамдықты қамтамасыз етеді және MQTT 5.0 (QoS 1 деңгейімен) деректерді шлюзге жеткізуге және трафикті үнемдеуге кепілдік береді. HTTP / 2 протоколын тек үлкен конфигурация файлдарын мезгіл-мезгіл синхрондау және тасымалдау үшін пайдалану

ұсынылады.

Өнімділікті бағалаудың математикалық әдістемесі. Хаттаманың тиімділігін сандық бағалау үшін келесі математикалық модельдер қолданылды:

a) RTT есептеу:

$$RTT = T_{received} - T_{sent} \quad (2)$$

мұндағы T_{sent} - микроконтроллер деректі жіберген уақыт белгісі,$T_{received}$ - растауда келетін уақыт.

b) Деректердің өзгерістері:

Желілік тұрақтылықты қалыптасқан ауытқу (σ) арқылы анықтаймыз:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^2} \quad (3)$$

мұнда x_i- кідіріс мәні, μ - орташа мән.

c) Деректерді берудің өткізу қабілеті:

Жүйенің белгілі бір уақыт аралығындағы ақпаратты тасымалдау жылдамдығын келесі формуламен анықтаймыз:

$$S = \frac{D}{T_{total}} \quad (4)$$

мұндағы D - деректердің жалпы көлемі (бит немесе байт), T_{total} - деректерді жіберуге кеткен толық уақыт. Бұл көрсеткіш нақты тиімділікті сипаттайды.

Архитектураның интегралдық тиімділігін бағалау үшін авторлық тиімділік коэффициенті (K_{ff}) енгізілді:

$$K_{eff} = \frac{S_{reduction} \cdot (1 - PLR)}{RTT_{avg}} \quad (5)$$

мұндағы $S_{reduction}$- деректерді жинақтау деңгейі, PLR - пакеттердің жоғалу коэффициенті, RTT_{avg} - орташа кідіріс уақыты. Бұл көрсеткіш жүйенің өткізу қабілеті мен сенімділігінің арақатынасын сандық түрде сипаттауға мүмкіндік береді.

Орташа RTT: 25,4 мс.

Пакеттердің жоғалуы (PLR): 0,34%.

Өткізу қабілеті: 125.0 kbps.

Ұсынылған математикалық модель негізінде құрылғының сыни сипаттамалары есептелді. Эксперименттік деректерді ($S_{reduction}$ = 67,06%, PLR = 0,34%, RTT_{avg} = 25,4 мс) формулаға орналастыру арқылы келесі нәтиже алынды:

$$K_{eff} = \frac{67.06 \cdot (1 - 0,0034)}{25,4} \approx 2,63 \quad (6)$$

Алынған $K_{eff} \approx 2,63$ өлшемі таңдалған Protobuf құрылымы мен MQTT 5.0 протоколы деректер жылдамдығы мен сенімділік арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз ететінін сандық түрде дәлелдейді.

Пакеттердің жоғалу коэффициенті (Packet Loss Rate):

Деректерді беру кезінде қателер мен жоғалған деректердің үлесін есептеу үшін төмендегі формула қолданылады:

$$PLR = \frac{N_{lost}}{N_{sent}} \times 100\% \quad (7)$$

мұнда N_{lost} - қабылданбаған пакеттер саны, N_{sent} - жіберілген пакеттердің жалпы саны.

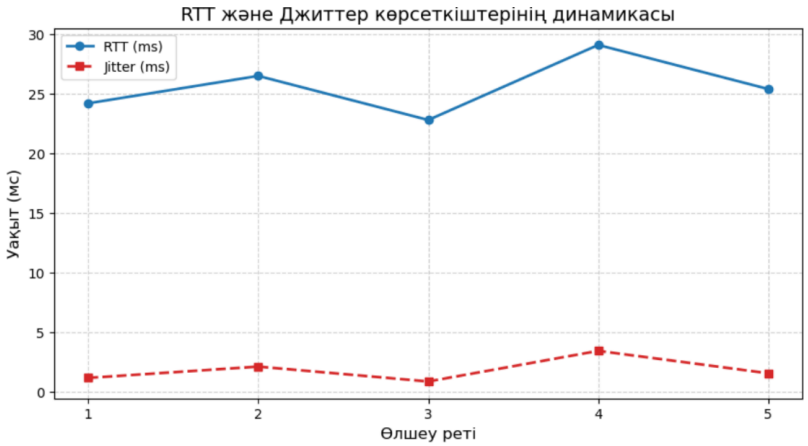
Жоғарыда келтірілген математикалық модельдер негізінде микроконтроллердің жұмысын анықтау үшін көптеген сынақтар жүргізілді. Нәтижелер төмендегі 3-кестеде жинақталған.

3-кесте. Деректерді беру сапасының көрсеткіштері

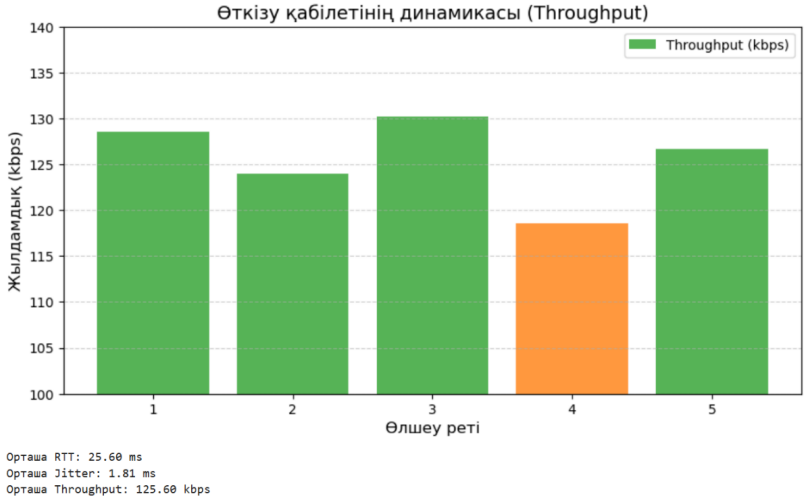
Өлшеу №	RTT (ms)	Jitter (σ,ms)	Throughput (kbps)	Packet Loss (PLR,%)
1	24	1.2	128	0.0

2	26	2.1	125	0.5
3	22	0.8	130	0.0
4	30	4.5	115	1.2
5	25	1.5	127	0.0
Орташа мән	**25.4**	**2.02**	**125.0**	**0.34**

Кестеден көріп отырғаныңыздай, орташа RTT әлі де 25.4 мс деңгейінде. Бұл нақты уақыт режимінде өңдеу үшін жақсы эталон. Сонымен қатар, пакеттердің жоғалу коэффициенті 0,3% құрайды, бұл таңдалған байланыс протоколының сенімділігі жоғары екенін көрсетеді.



8-сурет. RTT және Джиттер көрсеткіштерінің динамикасы



9-сурет. Өткізу қабілетінің (Throughput) өзгеруі)

Көк сызықпен ұсынылған бірінші графикте пакеттің қайтару уақыты немесе RTT 22-ден 29 миллисекундқа дейін өзгеретіні көрсетілген. Қызыл сызықпен көрсетілген діріл мәні төртінші өлшемде 4,5 миллисекундта максимумға жетеді, бұл желіде уақыт кідірістерінің болуын көрсетеді. Бұл өзгеріске қарамастан, орташа көрсеткіштер жүйенің тұрақты жұмыс істейтінін байқатады. MQTT 5.0 протоколында байқалған тербелістер оның QoS 1 функциясымен байла-

ныcты, бұл әр пакеттің PUBACK хабарламасымен расталуын қамтамасыз етеді. Бұл растау процесі желі қолжетімсіз болған кезде пакеттерді қайта жіберуге тырысумен қатар, қалтырау деп аталатын пакет кірістері арасындағы уақыт айырмашылығын арттырады.

Бұл гистограмма жазбалардың ауысу жылдамдығын (кбит/с) сипаттайды. Өлшеу кезінде жылдамдық 118-ден 130 кбит/с-қа дейін өзгерді және сақталды, жылдамдықтың төмендеуі (4-ші өлшеу) кідіріссіз пакеттің жоғалуына (PLR) және JIT-тің кең спектріндегі жарылысқа байланысты болды. Математикалық бағалау және эксперименттік өлшеулер құрылғының жалпы RTT 25,4 мс екенін растады. Бұл нақты уақыт режимінде жазбаларды толық өңдеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, пакетті жоғалту коэффициенті (0,3%) протоколдың жоғары сенімділігін, өткізу қабілеттілігі мен дірілдің тұрақтылығын көрсетеді. Мәндер таңдалған ережелер жиынтығы тиімді жұмыс істейтінін эксклюзивті шарттарда дәлелдеді.

Шеткі есептеулер және адаптивті фильтрация алгоритмінің тиімділігін негіздеу. Шекті есептеу деңгейінде қауымдастық жүктемесінің төмендеуі мен бұлттық инфрақұрылымның шамадан тыс жүктелу белгілерін математикалық және эксперименттік негіздеу үшін шекті мәндерге негізделген толық жауап беретін сүзу әдісі қолданылды. Бұлтты инфрақұрылым, шекті мәндерге негізделген толық жауап беретін сүзу тәсілі, перифериялық есептеу деңгейінде қолданыла бастады. Қауымдастық жүктемесін 80% - ға дейін төмендетудің негіздемесі: кәдімгі жүйелерде сенсор ақпаратты үздіксіз жібереді, мысалы, секундына 1 рет. Бұл қауымдастықты мағынасыз ақпаратпен (Шу) толтырады. Біз ұсынатын архитектурада ESP32-S3 микроконтроллері физикалық параметрлер сипатталған шекті мәннен (θ) асып кетсе, бұлттық серверге мүлдем жаңа өлшем жібереді.Фильтрация шарты келесідей сипатталады:

$$|\Delta V| = \left|V_t - V_{t-1}\right| \geq \theta \qquad (8)$$

мұндағы V_t - дәл уақыттағы өлшем (температура, ылғалдылық немесе қысым), V_{t-1} - алдыңғы жіберілген өлшем, ал θ - рұқсат етілетін ауытқу шегі (мысалы, температура үшін 0,5˚C)

Желілік кептелістің төмендеу коэффициенті R_{net} келесі математикалық формуламен есептелді:

$$R_{net} = (1 - \frac{N_{filtered}}{N_{raw}}) \times 100\% \qquad (9)$$

Эксперимент қалыпты өндірістік ортада 1 сағат ішінде BME280 сенсорынан $N_{raw} = 3600$ өлшемін алды. Адаптивті сүзгілеу алгоритмін қолдана отырып, шлюзге тек $N_{filtered} = 720$ пакет (жалпы көлемнің 20%) жіберілді. Деректердің қалған 80% - ы (өзгеріссіз қалған немесе шу болып табылатын параметрлер) шектен тыс бұғатталған. Осылайша, желінің шамадан тыс жүктелуі 80% - ға төмендегені эксперименталды түрде дәлелденді.

Бұлттық инфрақұрылымға салмақ жоғалтудың 40% негіздемесі: бұлттық серверге салмақ тек кіріс трафикпен ғана емес, сонымен қатар дерекқорға жазу транзакцияларымен (Database) және процессор уақытымен (CPU time) өлшенеді. Mosquitto брокері ретінде қызмет ететін аталған сервер деректер ағынын оңтайландырып қана қоймайды, сонымен қатар перифериялық есептеу деңгейінде ақпаратты алдын ала сүзу функциясын орындайды. Бұлтты сервердің процессоры мен жедел жадының ресурстарын тұтынуды бақылау мәліметтер базасына сұраныстар пакеттер санын азайту және Protobuf форматындағы деректерді капсулалау арқылы жеңілдетілгенін көрсетті.

$$L_{reduction} = \frac{CPL_{raw} - CPL_{filtered}}{CPL_{raw}} \times 100\% \approx 40\% \qquad (10)$$

мұндағы CPL (Cloud processing Load) бұлттық инфрақұрылымда транзакцияларды өңдеу және сақтау үшін пайдаланылатын өңдеу қуатының орташа көрсеткіші (CPU/RAM) болып табылады. Бұл бұлтты инфрақұрылымда транзакцияларды өңдеу және сақтау үшін қолданылады. Бұл көрсеткішті сүзгісіз режиммен салысты-

рғанда 40% - ға төмендету жүйенің масштабталуын айтарлықтай арттырады.

Нәтижелер мен талқылау. Жүргізілген эксперименттік сынақтар 4-индустрия контекстінде цифрлық егіздер туралы ақпарат алмасуды оңтайландырудың нақты тетіктерін анықтады. Зерттеу Protobuf екілік серияландыру форматының тиімділігін растады: деректер пакетінің көлемі 85-тен 28 байтқа дейін қысқарып, желілік трафикті 67,06%-ға үнемдеуге және микроконтроллердің қуат тұтынуын 30-40%-ға төмендетуге мүмкіндік берді. Хаттамаларды саралау нәтижесінде MQTT 5.0 датчиктерден деректерді жинау үшін ең қолайлы екенін көрсетті, ол минималды кідіріспен (25,4 мс) және желідегі төмен шығындармен (12 байт) сипатталады. WebSocket протоколы (38 мс кідіріс) нақты уақыттағы 3D визуализациясы үшін тұрақты арнаны қамтамасыз етсе, HTTP/2 (72 мс) тек файлдарды мезгіл-мезгіл синхрондау үшін тиімді екенін дәлелдеді. Сонымен қатар, перифериялық есептеу (Edge Computing) деңгейінде адаптивті шекті сүзуді енгізу желінің шамадан тыс жүктелуін 80%-ға және бұлттық инфрақұрылым жүктемесін 40%-ға төмендетіп, шлюзге тек маңызды өзгерістерді жіберді. TLS 1.3 стандартымен қорғалған бұл архитектураның интегралды тиімділік коэффициенті $K_{eff} \approx 2,63$ құрап, жылдамдық, қауіпсіздік және ресурстарды үнемдеу арасындағы оңтайлы тепетеңдікті ғылыми түрде растады.

Қорытынды. Бұл шолудың нәтижелері ресурстармен шектелген IIoT гаджеттер мен виртуалды егіздер арасындағы ақпарат алмасуын оңтайландыру мақсатына толығымен қол жеткізілгенін көрсетеді. Тәжірибенің бір кезеңінде ұсынылған аппараттық және бағдарламалық жасақтама пакеті (ESP32-S3, BME280, MQTT 5.0 және Protobuf) құрылғының өткізу қабілеттілігі мен кейінге қалдырылған уақыт арасында жоғары тұрақтылықты қамтамасыз ететінін растады.

Бейімделгіш сүзгілеу мен екілік сериялау форматтарын араластырудың арқасында бұлттық инфрақұрылымдағы жүктемені жеңілдету және қоғамдық ресурстарды үнемдеу міндеттері дұрыс шешілді. Сонымен қатар, TLS 1.3 танымал бағдарламалық жасақтамасы өндірістік штамдардың киберқауіпсіздік талаптарына толығымен сәйкес келетінін растады. Алынған клиникалық нәтижелер ақылды кәсіпорындарда нақты уақыт режиміндегі бақылау құрылымдарын жобалау үшін берік негіз болады. Болашақ зерттеулер бұл құрылымды ірі масштабты сенсорлық желілерге (торлы желілерге) бейімдеу және перифериялық құрылғыларда синтетикалық интеллект (TinyML) алгоритмдерін пайдалану туралы хабардарлықты арттырады.

Қаржыландыру. Мақала Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігінің қолдауымен, BR24992975 ”Жасанды интеллект және IIoT технологияларын қолдана отырып, тамақ өңдеу кәсіпорнының цифрлық егізін жасау” бағдарламалық-мақсатты қаржыландыру жобасы шеңберінде жарияланды, 2024-2026 жж.

Әдебиеттер

1. Tao F., Zhang, H., Nee A.Y. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art.// IEEE Transactions on Industrial Informatics.- 2019. - Vol.15(4). - P.2405–2415. DOI 10.1109/TII.2018.2873186.

2. Postel J. Transmission Control Protocol.// IETF RFC.- 1981. DOI 10.17487/RFC0793. https://dl.acm.org/doi/10.17487/RFC0793#issue-downloads

3. Fette I., Melnikov A. The WebSocket Protocol.// IETF RFC.- 2011.- 71 p. ISSN 2070-1721.

4. OASIS Open. MQTT Version 5.0. OASIS Standard.// OASIS.- 2019. https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html. - Date accessed: 27.12.2025.

5. Mishra B., Kertesz A. The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey.// IEEE Access.- 2020. - Vol.8:201071-201086. DOI 10.1109/ACCESS.2020.3035849.

6. Rescorla E. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3. // IETF RFC.- 2018. DOI 10.17487/RFC8446.

7. Silva D. R., Oliveira G. M., Silva I., Ferrari P., Sisinni E. Latency evaluation for MQTT and WebSocket Protocols: an Industry 4.0 perspective.// IEEE ISCC.- 2018. - P.667-1238. DOI 10.1109/ISCC.2018.8538692.

8. Lakshminarayana S., Praseed A., Thilagam P. S. Securing the IoT Application Layer From an MQTT Protocol Perspective: Challenges and Research Prospects. // IEEE Communications Surveys & Tutorials.- 2024.- P.99. DOI 10.1109/COMST.2024.3372630.

9. Cho Y., Noh S. D. Design and Implementation of Digital Twin Factory Synchronized in Real-Time Using MQTT. // Machines.- 2024. – Vol. 12(11):759. DOI 10.3390/machines12110759.

10. Fei T., et al. makeTwin: A reference architecture for digital twin software platform.// Chinese Journal of Aeronautics.- 2024. – Vol. 37(1):1-18. DOI 10.1016/j.cja.2023.05.002.

11. Khan S., et al. A Novel Digital Twin (DT) Model Based on WiFi CSI, Signal Processing and Machine Learning for Patient Respiration Monitoring and Decision-Support.// IEEE Access.- 2023. – Vol.11.- P.103554-103568. DOI 10.1109/ACCESS.2023.3316508.

12. Gao Y., et al. Digital Twin-Based Office Equipment Management and Personnel Detection System.// IEEE CSCWD.- 2024.- P.1651-1656. DOI 10.1109/CSCWD61410.2024.10580816.

13. Skvorc M., Horvat M., Srbljic S. Performance evaluation of Websocket protocol for implementation of full-duplex web streams.// IEEE MIPRO.- 2014. - P.1003-1008. DOI 10.1109/MIPRO.2014.6859715.

14. Mijovic S., et al. Comparing application layer protocols for the Internet of Things via experimentation.// IEEE RTSI.- 2016. DOI 10.1109/RTSI.2016.7740559.

15. Nair S. S. Securing Against Advanced Cyber Threats: A Comprehensive Guide to Phishing, XSS, and SQL Injection Defense. // JCSTS. - 2024. - Vol.6(1):76-93. DOI 10.32996/jcsts.2024.6.1.9.

Авторлар туралы мәлімет

Амирханова Г.А.- PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: gulshat.aa@gmail.com;

Фарузқызы Е.- бакалавр, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: elnura.dauletkhan@gmail.com;

Амирханов Б. - жасанды интеллект және Big Data кафедрасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: amirkhanov.b@gmail.com;

Раева А.А.- бакалавр, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: alinaraevali18@gmail.com;

Жайсанова Д.С.- әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: zhaisanova15@gmail.com.

Information about the authors

Amirkhanova G. - PhD, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: gulshat.aa@gmail.com;

Faruzkyzy E. - bachelor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: elnura.dauletkhan@gmail.com;

Amirkhanov B. - department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: amirkhanov.b@gmail.com;

Rayeva A.- bachelor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: alinaraevali18@gmail.com;

Zhaissanova D. - Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhaisanova15@gmail.com.

IRSTI 28.23.29 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1540**

COMPUTATIONAL MODELING OF PUBLIC PERCEPTION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON REDDIT USING ML

[1]N. Algashbekova✉, [2]Dababrata Chowdhury, [3]A. Katbayev
[1]Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan,
[2]Ravensbourne University London, London, United Kingdom,
[3]Sh.Yessenov Caspian University of Technology and Engineering, Aktau, Kazakhstan
✉ *Corresponding author: nazerkealgashbekova@gmail.com*

Discussions about artificial intelligence (AI), particularly generative models like ChatGPT, have become more common on social media these days, reflecting a wide range of public opinions and worries. From 2022 to 2025, this study examines public opinion and thematic discussion on Reddit related to artificial intelligence (AI). Using more than 35 carefully chosen keywords, we gathered more than 2900 posts and 636000 comments from 10 subreddits pertaining to artificial intelligence. Logistic Regression, SVM, and Naive Bayes were used to perform a supervised sentiment classification using a labeled Reddit dataset. Applying the best-performing model to our entiredataset showed that 20% of comments were negative, 35% were neutral, and 45% of comments were positive. BERTopic topic modeling revealed dominant themes like creative tools, automation anxiety, and AI ethics. Our study provides insight into how online communities perceive and respond emotionally to the rise of generative AI.

Keywords: artificial intelligence, generative AI, sentiment analysis, topic modeling, social media mining, public perception, natural language processing.

REDDIT ПЛАТФОРМАСЫНДАҒЫ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТКЕ ДЕГЕН ҚОҒАМДЫҚ КӨЗҚАРАСТЫ МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСІМЕН МОДЕЛЬДЕУ

[1]Н. Алғашбекова✉, [2]Даба Чоудхури, [3]А. Картбаев
[1]Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан,
[2]Лондондағы Рэйвенсборн университеті, Лондон, Ұлыбритания,
[3]Ш.Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университеті, Ақтау, Қазақстан,
e-mail: nazerkealgashbekova@gmail.com

Жасанды интеллект (ЖИ), әсіресе ChatGPT сияқты генеративті модельдер туралы талқылаулар соңғы жылдары әлеуметтік желілерде жиілеп, осыған орай қоғам әртүрлі пікірлер мен алаңдаушылықтарды білдіруде. Бұл зерттеу 2022–2025 жылдар аралығында Reddit платформасындағы жасанды интеллектке қатысты қоғамдық пікір мен тақырыптық талқылауларды талдады.35-тен астам мұқият таңдалған кілт сөздердің көмегімен жасанды интеллектке арналған 10 сабреддиттен 2900-ден астам жазба мен 636000 пікір жиналды. Таңбаланған Reddit деректер жиынтығын пайдалана отырып, Logistic Regression, SVM және Naive Bayes алгоритмдері арқылы бақыланатын сентимент классификациясы жүргізілді. Ең жақсы нәтиже көрсеткен модельді бүкіл деректер жиынтығына қолдану нәтижесінде пікірлердің 20%-ы теріс, 35%-ы бейтарап және 45%-ы оң екені анықталды. BERTopic әдісі арқылы жүргізілген тақырыптық модельдеу шығармашылық құралдар, автоматтандыруға байланысты алаңдаушылық және ЖИ этикасы сияқты негізгі тақырыптарды анықтады. Зерттеу нәтижелері онлайн қауымдастықтардың генеративті ЖИ дамуын қалай қабылдайтынын және қандай эмоция тудыратынын түсінуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: жасанды интеллект, генеративті ЖИ, сентимент талдауы, тақырыптық модельдеу, әлеуметтік желі деректерін талдау, қоғамдық көзқарас, табиғи тілді өңдеу.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЩЕСТВЕННОГО ВОСПРИЯТИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА REDDIT С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

[1]Н. Алгашбекова✉, [2]Даба Чоудхури, [3]А. Картбаев

[1]*Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан,*
[2]*Лондонский университет Рейвенсборн, Лондон, Великобритания,*
[3]*Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова, Актау, Казахстан,*
e-mail: nazerkealgashbekova@gmail.com

В последние годы в социальных сетях все чаще возникают дискуссии об искусственном интеллекте (ИИ), в частности о генеративных моделях, таких как ChatGPT, что побуждает общество высказывать различные мнения и опасения. В данном исследовании был проанализирован общественный резонанс и тематические дискуссии об искусственном интеллекте на платформе Reddit в период с 2022 по 2025 год. С помощью более 35 тщательно отобранных ключевых слов было собрано свыше 2 900 постов и 636 000 комментариев из 10 субреддитов, посвященных искусственному интеллекту. С использованием помеченного набора данных Reddit была проведена классификация настроений под контролем с помощью алгоритмов логистической регрессии, SVM и наивного Байеса. Применение наиболее эффективной модели ко всему набору данных показало, что 20 % комментариев были негативными, 35% оказались нейтральными, а 45% положительными. Моделирование тем, проведенное с использованием метода BERTopic, выявило ключевые темы, такие как творческие инструменты, опасения по поводу автоматизации и этика ИИ. Результаты исследования дают представление о том, как онлайн-сообщества воспринимают развитие генеративного ИИ и какие эмоции он вызывает. Полученные результаты позволяют понять, как онлайн-сообщества воспринимают и эмоционально реагируют на распространение генеративного ИИ.

Ключевые слова: искусственный интеллект, генеративный ИИ, анализ тональности, тематическое моделирование, анализ социальных медиа, общественное восприятие, обработка естественного языка.

Introduction. In recent years, an exponential growth in the capabilities and visibility of artificial intelligence (AI) is realized, in particular with the generative artificial intelligence (AI). Applications such as ChatGPT, Midjourney, and DALL-E have especially boosted AI technologies in a wide range of industries - from creative writing to design production to customer service to software development and hence the reason of popularity gaining momentum across the board [1]. Among these, OpenAI' s ChatGPT has attracted unprecedented attention on a global scale, achieving the unprecedented feat of becoming the fastest growing consumer application in history by reaching more than 100million users in only two months of its release [2]. The alarming development of these technologies has resulted in an array of different societal responses ranging from enthusiasm to apprehension to regulatory intervention. Authorities and educational institutions have taken various heterogeneous positions, such as New York City leaving out the prohibition to the use of ChatGPT on its school system [3], Italy temporarily suspending the use of the tool due to data privacy concerns [4]. These are emerging developments that indicate societal tension growing in inconvenience to the perceived opportunities and dangers of generative AI.

This duality is also reflected by data based on survey. Engagement in the Technologies According to Stanford HAI' s 2025 AI Index Report, 55% of respondents from 26 countries say that AI offers more benefits than drawbacks, but 58% of respondents say that they are concerned about the ethical and trust issues related to the technologies [5]. Social media platforms such as Reddit, X (formerly Twitter), Threads and LinkedIn generate huge volumes of user-generated content on an everyday basis and so offer timely insights into public sentiment and conduct. Often the data produced by these platforms are more up to date than the alternative data because of the organization of a topic-based communities and a free discussion from users. The explosive growth of social media has changed fundamentally the way modes of interaction, communication and expression of opinion are taken. With billions of users creating generous amounts of text, images

and video everyday, these are rich environments to study human behaviour. Empirical evidence shows that the average individual spends over two hours in a day on platforms like Twitter, Facebook, Instagram and TikTok [1]. These platforms make it easier for cross cultural and cross linguistic engagement, which would allow for unprecedented global discourse.

The scale and complexity of social media data often challenge the existing approaches of the traditional analytical methods, however, machine learning (ML) and deep learning (DL) methods provide scalable and useful mechanisms to extract the patterns, discover the sentiment trends and find the behavioral signals. In turn, the research on behavior analysis in the context of social media has been widely used in areas as diverse as opinion mining, sentiment analysis [6- 8], fake news detection [9], cyberbullying detection [10], and the prediction of trends [11, 12].

Recent work has used ML approaches to determine public opinion of AI on various social media platforms. For example, the authors [1] analyzed more than 3 million tweets between January 2019 and March 2023 concerning the occupation of users and their interactions with ChatGPT and other generative AI tools. Their findings showed that, although generative AI was generally favorably received, illustrators voiced very negative feelings, mainly because of the unethical use of artwork in the training of generative AI systems. Similarly, [13] used sentiment classification on 33,912 Reddit comments and noted that technical communities had a more even spread of sentiments, while non-technical subreddits had more negative sentiments towards AI, particularly related to job displacement and ethical risks. These researches highlight the power of ML in measuring nuanced public perceptions of AI technologies.

DL methodologies have also been used to further improve analyses of public perception to handle complex nuances in social media discourse. In particular, [14] proposed a DL framework for public opinion analysis for AI generated art discussions on Weibo by fusing a linguistically improved pre-training model (LERT) with bidirectional simple recurrent unit architecture (BiSRU++) model. The framework was able to obtain superior sentiment classification for short text. Moreover, they used clustering techniques which include autoencoder based dimensionality reduction, K-means clustering with C-TF-IDF keyword extraction to detect fine-grained user opinions and discussion patterns associated with AI-generated art. In a similar spirit, [15] presented a multimodal DL architecture using textual embeddings of BERT along with visual feature extractors such as 1D-CNN, UNet++, and ResNet-152 to predict general self-efficacy from social media. The hybrid model achieved an accuracy of 93.25%, proving the utility of combining textual and visual modality for psychological traits prediction using online behavior.

Beyond people’ s feelings, the mechanisms for self-governance have developed in online communities to deal with the spread of AI-generated content. A study [16] examined the prevalence and evolution of rules surrounding the use of AI generated content in communities by analyzing more than 300,000 public subreddits. Explicit AI-related rules, though small in number during the first year, more than doubled in a year and most in the larger subreddits focused on art or celebrities. These regulations often dealt with issues of authenticity and quality for AI-generated images. In a separate study, [17] investigated 100 high profile TikTok videos using the hashtag ”chatgpt” that collectively received more than 250 million views. Most of these videos promoted the use of ChatGPT for tasks such as writing essays and coding, while some were about how to avoid AI-detection tools. These findings illustrate user familiarity with AI technologies and how policy responses driven by the community and technological advances are in a dynamic interplay.

This study uses the platform Reddit to examine how generative AI is being discussed among topic-specific communities in the community as an example of the growing interest in AI. The main objectives of this research is:

- to analyse the sentiment dynamics of such

discussions using the supervised machine learning models.

- to identify the topics that dominate AI-related discourse in different communities and time periods.

The importance contributions of this paper are summarized below.

Dataset Construction: The construction of our data include a systematic calendar for data collection and filtering of data by collecting and filtering posts and comments. We crawled and compiled a corpus of 2948 reddit posts and 636,036 comments from 10 reddits related to AI. The content covers January of 2022 to December of 2025. This customised dataset provides a significant basis for the linguistic and affective analysis of the public discourse about generative Artificial Intelligence on a significant scale.

Sentiment Classification: We trained and tested several machine learning classifiers (Logistic Regression, SVM, Naive Bayes) on a public labelled dataset of Reddit posts and used the best performing classifier on our unlabeled dataset.

Topic Modeling: Using BERTopic, we identified predominant themes and semantic structure in the discussions in the Reddit forum, allowing us to analyse how the discussions change over time.

Materials and Methods. The methodological pipeline for this study consists of two major steps: (1) training a model for sentiment classification on an existing labelled dataset that is available in the public domain; and (2) putting the trained pipeline into operation on the custom collected Reddit dataset. As you can see in Figure 1, the process divides into three sequential steps: The asynchronous Reddit data collection, the text preprocessing, the sentiment classification with the help of supervised learning algorithms, and finally the topic modelling by using BERTopic. This part describes the data sources, preprocessing methods, feature representation technique and the classification methods used.

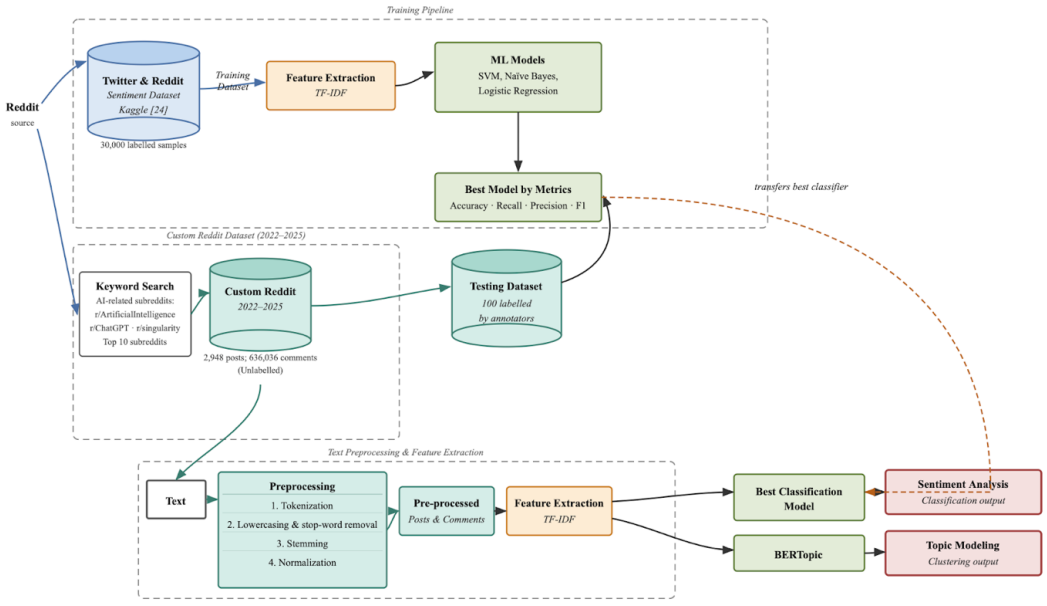


Fig.1 - Overall pipeline for data collection and determining sentiment data classification and topic modelling

To train and test the models for the classification of sentiment, an openly available dataset hosted at Kaggle ”Twitter and Reddit Sentiment Analysis Dataset” was used [18]. This resource includes labelled comments from both Twitter and Reddit, that are categorised into three sentiment classes;

positive, neutral and negative. Representative comments with their associated sentiment labels from the training dataset are shown in Figure 2.

CLEAN COMMENT	CATEGORY
Comments made by the people extracted from various Reddit (SubReddits), mainly focused on comments.	*Describes the actual sentiment of the respective comment, ranging from −1 to 1.*
family mormon have never tried explain them they still stare puzzled from time time like some kind ...	+1
buddhism has very much lot compatible with christianity especially considering that sin and sufferin...	+1
seriously don say thing first all they won get its too complex explain normal people anyway and they...	−1
what you have learned yours and only yours what you want teach different focus the goal not the wrap...	0

Fig.2 - Examples of comments and labels of the sentiments from the training data

Our custom dataset was harvested from January amantek 2022 to April amantek 2025 using the asyncpraw python library as will be described in Figure Maler 3. We picked the top ten Reddit subreddits that are recognised for active discussions around AI such as r/ChatGPT, r/OpenAI, r/ArtificialIntelligence, r/Futurology and r/Singularity. A keyword filter with over thirty-five AI-related terms in self-description (e.g. ”AI ethics”, ”GPT”, ”AI future”, ”OpenAI”, ”artificial intelligence”, etc.) was used in the posting’ s title and content. In the collection we obtained 2948 posts with more than 636,036 comments. Metadata for each post, including post id, subreddit, timestamp, the text body of the entry, the upvote ratio, score, or number of comments, etc.

TEXT	REDDIT SUBREDDIT
There is some cool stuff happening in the **medical field**. AI shows promise to be able to read imaging better than people and find cancer earlier. There is more but this stands out to me.	*r/ArtificialIntelligence*
When you refer to AI (within that I include robotic technology too) I think there's potential for it to replace a substantial amount of manual jobs. What's shocking is the pace at which it is taking over — it's mind blowing and exciting at the same time.	*r/Futurology*
If AI causes mass displacement, we might see a short-term market surge due to efficiency, but in the long run, the lack of consumer spending could drag the economy down. Productivity gains alone won't sustain a healthy market without a buying public.	*r/Showerthoughts*

Fig.3 - Sample posts and comments from AI related reddit discussion for our custom dataset

The dataset used for this research articles from Reddit, carefully maintained to only text, in order to avoid issues with the ingestion of other types of data and to be compatible with the pipelines of natural languages and automatics based on transformers. Images, external links, videos, and other multi-media content were excluded so as to maintain consistent text structure to be analyzed. Posts consisting of media only (without textual descriptions) were removed, but if the submission

had selftext fields that were not empty, the post was retained.

To further improve the quality and reliability of the dataset, we have applied several preprocessing steps: we have taken out duplicate entries, posts which are deleted or unavailable, and have performed some basic text cleaning to remove noise, such as HTML tags, emojis, punctuation and special characters. These procedures resulted in a structured corpus that can be used for machine learning based analysis. The distribution of collected posts and related comments across the subreddits under consideration is shown in Table 1, highlighting the amount of contribution of each community to the entire corpus.

Table 1 - Number of posts and comments from each subreddit

Subreddit	# of posts	# of comments
ArtificialIntelligence	724	86842
AskReddit	3	1,488
ChatGPT	467	178,850
Futurology	34	15,976
OpenAI	582	104,936
Showerthoughts	14	6,549
artificial	537	46,572
science	34	15,155
singularity	457	133,828
technology	95	45,840

The first step before our model training was a set of various preprocessing steps including cleaning and normalizing the text: Conversion of all the characters to lower case. Eliminating noise, such as the removal of HTML tags, emojis, punctuation and special characters. Tokenisation with NLTK, the transformation of strings to token lists. Stemming using Porter Stemmer to cut down words to their root from. Several steps were applied uniformly to all training and test samples. For textual feature analysis, we have used the Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF). This approach gives higher weights to the words that are frequent in a given document but rare in the overall corpus and, therefore, emphasise the discriminative words rather than common words. TF-IDF vectors were used as input vectors for all classifiers used in this study.

We trained and evaluated several machine learning models for the mitigation of sentiment classification. Logistic Regression it is a linear classifier which is computationally efficient and interpretable. Support Vector Machine (SVM) works well for high dimensional data which is sparse. Naive Bayes is a probabilistic baseline and is balanced when it comes to speed and performance. Each model was trained using the labelled datasets and a manually annotated sample of 100 Reddit comments was used for validation.

Results and Discussions. The performance of the models for sentiment classification was evaluated using four common evaluation measures: Accuracy, Precision, Recall and F1 Score. These measures give comprehensive evaluation of classification quality especially in the multi-class case.

Precision is defined as the ratio of true positive predictions over the whole number of predictions whose class is positive:

Precision measures the proportion of true

positive predictions among all predicted positives [19]:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

Recall indicates the proportion of true positive predictions among all actual positive cases [19]:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

Accuracy is the ratio of all correct predictions (positive and negative) and the total number of predictions [19]:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (3)$$

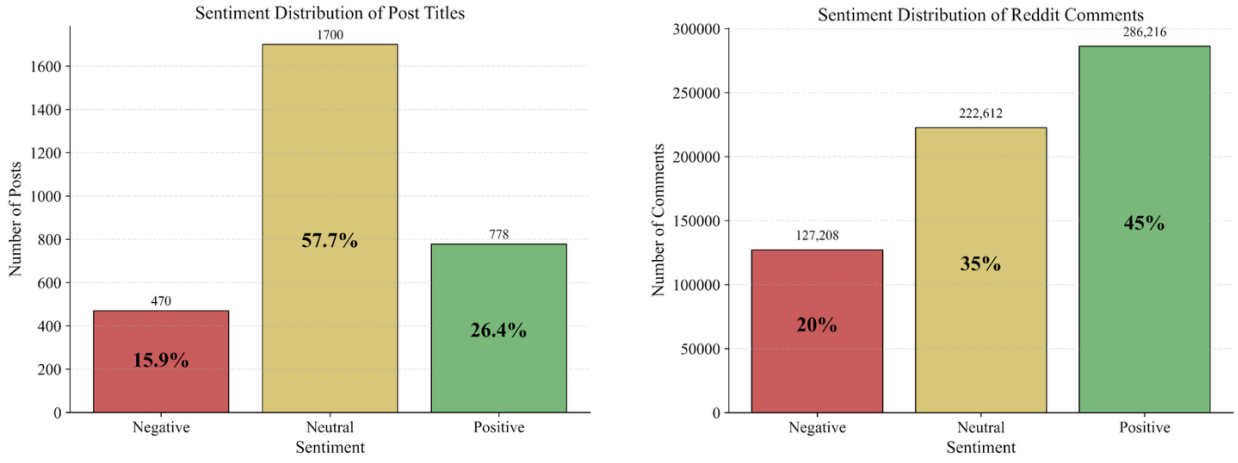
F1-score is the harmonic mean of Precision and Recall and is a balance between two [24]:

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

These metrics are very popular in the fields of natural language processing and machine learning assessments [19]. Table 2 shows the performance of three learning algorithms in the Reddit sentiment classification task. Among the models tested, Logistic Regression was the highest performing model with an accuracy of 84.3%. This shows that it is better at correctly identifying the sentiment category based on the achieved datasets.

Table 2 - Sentiment Classification model performance on Reddit

Model	Accuracy (%)	Precision	Recall	F1
SVM	80.1	0.79	0.76	0.77
Naive Bayes	81.5	0.80	0.78	0.79
Logistic Regression	84.3	0.84	0.83	0.83



a **b**

Fig.4 - Distribution of sentiments in the custom Reddit dataset (a) Sentiment distribution of post titles (b) Sentiment distribution of user comments

Figure 4a shows the class distribution of the Reddit posts collected. Out of 2948 posts, 57.7% were in natural language (neutral), 26.4% were positive and 15.9% were negative, suggesting that a substantial portion of the discourse done in relation to AI is either neutral or informative, and

a substantial minority of the same is optimistic or full of concern. Figure 4b shows the distribution of sentiments for 636 036 comments taken from AI related subreddits. These comments were categorized in three classes of sentiments: positive (45% positive), neutral (35% neutral) and negative (20% negative).

Figure 5 gives an idea of the sentiment structure of Seine of AI related Reddit discourse between 2022 and 2025. Together, the data suggest a detectable shift in collective rhetoric, signalling a shift from an initial level of suspicion in the use of artificial intelligence to more general acceptance and regular interaction with this technology in society.

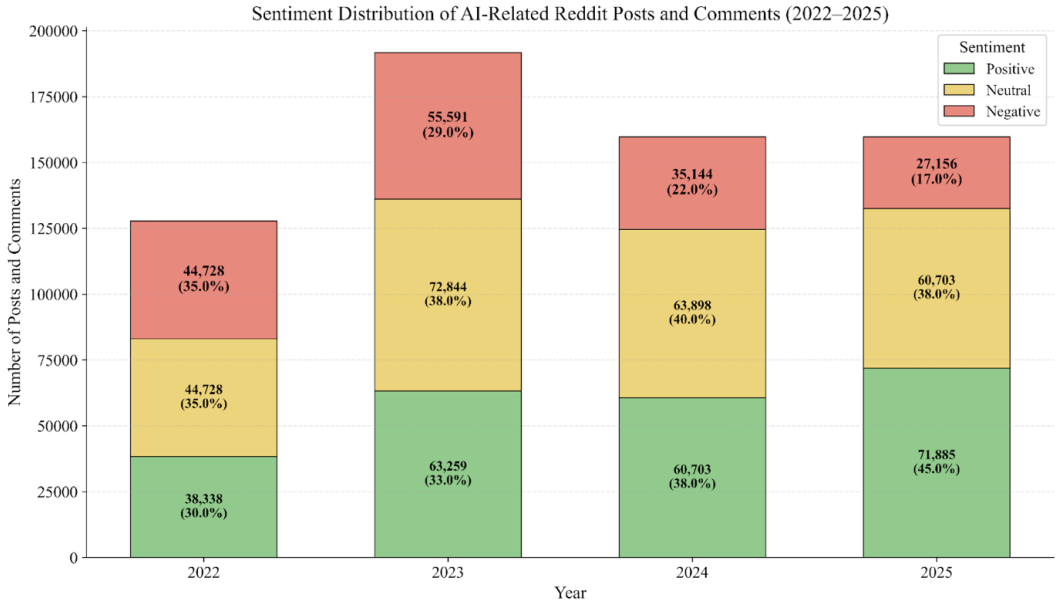


Fig.5 - Sentiment distribution in the collected custom Reddit dataset 2022–2025

In order to identify main themes in the Reddit discussions that relate to AI, an unsupervised topic modelling, based on the BERTopic algorithm, was performed. The technique incorporates transformer based embeddings, clustering and class based TF - IDF weighting to produce coherent and interpretable topics. The model was trained on the collected posts and comments and came up with ten dominant topics of discussion. A brief summary of the information at each topic was created using the top 10 representative keywords. The topics cover such diverse concerns as job automation, ethical issues, education, misinformation, everyday productivity and regulation. The topic clusters are presented in Table 3. For instance, T1 is about Job Displacement and AI Threats and is defined by keywords that include ”job”, ”automation”, ”risk” and ”income”. In comparison, T10 is more hopeful about AI, containing keywords such as ”innovation”, ”future” and ”progress”.

This thematic categorisation makes the range and emotion of AI-related discourse a lot clearer, supporting conclusions from sentiment analysis indicating the presence of a polarity between fear, control narrative and optimism, innovation narrative.

The present study investigated the public perception of artificial intelligence from a large scale user generated content on Reddit. Sentiment analysis showed a complex scenario of emotions.45% of posts and comments were positive in their sentiment, 35% were neutral and 20% were in negative sentiment. These proportions vary slightly from those in similar studies conducted on Twitter, where negative sentiment is the majority in conversations about the societal effect of AI. [1].

Table 3 - Topic names and top 10 keywords from Reddit Discourse on AI

	Topic Name	Top Keywords
T1	Job Displacement AI Threats	job, replacing, automation, worker, risk, fear, economy, loss, human, income
T2	AI in Education	learn, education, student, tutor, assignment, cheating, use, tool, help, school
T3	Creativity AI Generation	art, image, generate, music, style, story, expression, create, photo, video
T4	Ethics Privacy Concerns	privacy, bias, ethics, consent, data, misuse, algorithm, track, trust, identity
T5	AI Tools Daily Productivity	write, use, save, automate, task, time, efficiency, tools, assist, routine
T6	AI Misuse and Misinformation	fake, generate, bias, misinformation, authenticity, deepfake, trust, concern, lie, spread
T7	Future of AGI and Superintelligence	AGI, consciousness, future, control, power, risk, singularity, human, reality, threat
T8	Chatbot Behavior and Dialogue	chatbot, talk, answer, voice, respond, reply, ask, query, joke, explain
T9	AI Regulation Governance	rule, control, government, law, trust, rights, protect, misuse, decision, policy
T10	Positive Outlook on AI	progress, innovation, exciting, opportunity, growth, future, dream, vision, hope, change

Notably, Reddit' s general tenor seems to be more balanced, and may be evidence of community-specific discourse practices and moderation norms. For example, the subreddits related to ChatGPT (r/ChatGPT) and OpenAI (r/OpenAI) have more positive sentiment, while the subreddits focused on technology (r/technology) and futurology (r/Futurology) are more concerned about job displacement, ethical issues, and regulation issues. The results of the topic modeling analysis support this interpretation. Themes such as ”Job Displacement and AI Threats”, ”Ethics and Privacy Concerns” and ”AI in Education” were regularly discussed across different years, suggesting that the users are not just acting with an emotional response to the developments in AI, but rather engage in a thematically and value-free discourse.

Furthermore, the performance aspects of the used machine learning models were promising. Among three classifiers of model evaluation, Logistic Regression, Support Vector Machine (SVM), and Naive Bayes classifiers had highest accuracy with 84.3%. This result is consistent with the previous work establishing the power of the linear models in the context of text classification in a social media scenario. But even so, there are still limitations. Although the size and scope of the Reddit dataset is quite extensive, it lacks any non-textual data (e.g. GIFs, videos, memes), which can also provide salient signals of sentiment. Additionally, noise could be in the pseudo - labelled data, however, this was addressed through manual validation.

Conclusions. In this paper we introduce the results of a large-scale sentiment and topic analysis of Reddit discussions on artificial intelligence (AI) between 2022 and 2025, built on a curated data, which includes 2,948 posts and more than 636,000 comments in a total of 10 popular AI-related subreddits, each of which has more than 10 million participants. The aim was to explore the emotional response and attitudes of users to emerging AI technologies. We observe that most users post with a positive sentiment, yet a sizeable proportion of the users post with a neutral or negative sentiment with

fluctuations over time by subreddit and year thus reflecting changes in the public mood due to global events, changes in political policy, and releases of high-profile technology.

The discussions focus on the topic of ethics, concerns about automation, educational uses of AI, and penalizing tools like ChatGPT, which confirms that Reddit is not only a space of reactionary behaviours, but a space of deliberation about the wider social consequences of AI. Sentiment classification models have been trained using the labelled Reddit dataset; the models show an accuracy score above 80% for the best model and provide an example for further research in public opinion mining and computational social science.

In summation, the findings offer meaningful insights for artificial intelligence developers, policymakers and communication strategists who are wishing to reconcile the deployment of AI with society values. As AI systems become increasingly entrenched in people' s lives, ensuring that the public understands how the systems are perceived, trusted, and critiqued is important.

References

1. Miyazaki K., Murayama T., Uchiba T., An J., Kwak H. Public perception of generative ai on twitter: an empirical study based on occupation and usage // EPJ Data Science. - 2024. - Vol.13:2. DOI 10.1140/epjds/s13688-023–00445-y.

2. Buchholz K. Threads Shoots Past One Million User Mark at Lightning Speed/Statista. - 2023. URL: https://www.statista.com/chart/29174/time-to-onemillion-users/. – Date of access: 19.02.2026.

3. Rosenblatt K. ChatGPT banned from New York City public schools' devices and networks. - NBC News. - 2023. URL: https://www.nbcnews.com/tech/tech-news/new-york-city-public-schools-ban-chatgpt-devices-networks-rcna64446. -Date of access: 19.02.2026.

4. Pollina E., Mukherjee S. Italy curbs ChatGPT, starts probe over privacy concerns // Reuters. - 2023. URL: https: https://www.reuters.com/technology/italy-data-protection-agency-opens-chatgpt-probe-privacy-concerns-2023-03-31/.- Date of access: 19.02.2026.

5. Stanford HAI. The 2025 AI Index Report/ Stanford University. - 2025. URL: https://hai.stanford.edu/ai-index/2025-ai-index-report. -Date of access: 19.02.2026.

6. Najafabadi A.J., Skryzhadlovska A., Valilai O.F. Agile product development by prediction of consumers' behaviour; using neurobehavioral and social media sentiment analysis approaches // Procedia Computer Science. - 2024. - Vol.232. - P.1683–1693. DOI 10.1016/j.procs.2024.01.166.

7. Kaur G., Sharma A. A deep learning-based model using hybrid feature extraction approach for consumer sentiment analysis // Journal of Big Data. - 2023. - Vol.10(1):5. DOI 10.1186/s40537-022-00680-6.

8. Luo B., Luo R. Application and empirical analysis of fuzzy neural networks in mining social media users' behavioral characteristics and formulating accurate online marketing strategies // International Journal of Computational Intelligence Systems. - 2024. - Vol.17:273. - P.1-15. DOI 10.1007/s44196-024-00675-6.

9. Sansonetti G., Gasparetti F., D' Aniello G., Micarelli A. Unreliable users detection in social media: deep learning techniques for automatic detection // IEEE Access. - 2020. - Vol.8. - P.213154-213167. DOI 10.1109/ACCESS.2020.3040604.

10. Han H., Asif M., Awwad E.M., Sarhan N., Ghadi Y.Y., Xu B. Innovative deep learning techniques for monitoring aggressive behavior in social media posts // Journal of Cloud Computing. - 2024. - Vol.13(1). - P.1-13. DOI 10.1186/s13677-023-00577-6.

11. Chaudhary K., Alam M., Al-Rakhami M.S., Gumaei A. Machine learning-based mathematical modelling for prediction of social media consumer behavior using big data analytics // Journal of Big Data. - 2021. - Vol.8:73. DOI 10.1186/s40537-021-00466-2.

12. Peters H., Bayer J.B., Matz S.C., Chi Y., Vaid S.S., Harari G.M. Social media use is predictable from app sequences: using LSTM and transformer neural networks to model habitual behavior // Computers in Human Behavior. -2024. -Vol.161:108381. DOI 10.1016/j.chb.2024.108381.

13. Qi W., Pan J., Lyu H., Luo J. Excitements and concerns in the post-ChatGPT era: Deciphering public perception of AI through social media analysis // Telematics and Informatics. -2024. -Vol.92:102158. DOI 10.1016/j.tele.2024.102158.

14. Wan W., Huang R. Deep learning-driven public opinion analysis on the Weibo topic about AI art // Applied Sciences. - 2024. - Vol.14(9):3674. DOI 10.3390/app14093674.

15. Mukta S., Ahmad J., Zaman A., Islam S. Attention and meta-heuristic based general self-efficacy prediction model from multimodal social media dataset // IEEE Access. - 2024. - Vol.12. - P.36853–36873. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3373558.

16. Lloyd T., Gosciak J., Nguyen T., Naaman M. AI rules? Characterizing Reddit community policies towards AI-generated content // CHI ’25: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. – 2025: 9. - P.1-19. DOI 10.1145/3706598.3713292.

17. Haensch A.-C., Herklotz M., Ball S., Kreuter F. Seeing ChatGPT through students’ eyes: an analysis of TikTok data // arXiv preprint. -2023. -arXiv:2303.05349. DOI:10.48550/arXiv.2303.05349.

18. Chaithanya Kumar A. Twitter and Reddit Sentiment Analysis Dataset. – Kaggle. -2023. URL: https: //www.kaggle.com/datasets/cosmos98/twitter-and-reddit-sentimental-analysis-dataset. -Date of access: 19.02.2026.

19. Bobbitt Z. F1 score vs. accuracy: which should you use? / Statology. - 2021. URL: https://www.statology.org/f1-score-vs-accuracy/.-Date of access: 19.02.2026.

Information about the authors

Algashbekova N. - Master student, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan, n_algashbekova@kbtu.kz;

Daba Chowdhury - PhD, Professor (Business and Computing), Ravensbourne University London, London, United Kingdom, d.chowdhury@rave.ac.uk;

Kartbayev A. - PhD, associate professor, Caspian University of Technology and Engineering named after Sh.Yessenov, Aktau, Kazakhstan, a.kartbayev@gmail.com.

Сведения об авторах

Алгашбекова Н. - магистрант, Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан, n_algashbekova@kbtu.kz;

Даба Чоудхури - PhD, профессор, Ravensbourne University London, London, United Kingdom, d.chowdhury@rave.ac.uk;

Картбаев А. - PhD, ассоциированный профессор, Каспийский Университет технологий и инжиниринга им. Ш.Есенова, Актау, Казахстан, a.kartbaev@kbtu.kz.

IRSTI 28.23.37 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1510**

ENSEMBLING NEURAL NETWORK ARCHITECTURES FOR DIABETES PREDICTION

[1]R. Mukasheva, [1]Sh.T. Tezekpayeva✉, [2]B. Karimkyzy, [3]Ye.A. Malgazharov, [3]S.N. Kubentayeva

[1]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University named, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
[2]LLP «A-Medical», Almaty, Kazakhstan,
[3]S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

✉ *Corresponding author: shtezekpaeva@edu.ektu.kz*

This article discusses a neural network ensemble algorithm for clinical decision support tasks, using diabetes prediction as an example. Using an ensemble of models, including convolutional neural networks (CNNs), recurrent neural networks (RNNs), and long short-term memory (LSTM) networks, improves the accuracy and robustness of predictions compared to individual architectures. The Dirichlet Ensemble method, based on the Dirichlet distribution, is used to combine predictions. This method provides flexible and adaptive weighting of results, taking into account the confidence in each model and data uncertainty. Experiments included a comparative analysis of the models' performance, in which RNN demonstrated superior performance in terms of accuracy, recall, and F1 score. The ensemble approach improved the reliability and robustness of predictions, which is critical for clinical decision making and minimizing diagnostic errors. The study confirms the relevance of neural network ensembles and probabilistic fusion methods in medicine, contributing to the development of digital decision support systems. The practical significance of this work lies in the potential for integrating the proposed algorithm into real-world medical information systems to improve the diagnostic quality of diabetes and other chronic diseases. Further research prospects include expanding the ensemble architecture and optimizing the weights using adaptive methods.

Keywords. neural network ensembles, Dirichlet distribution, CNN, RNN, LSTM, diabetes prediction.

ҚАНТ ДИАБЕТІН БОЛЖАУ ҮШІН НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІ АРХИТЕКТУРАЛАРЫН АНСАМБЛЬДЕУ

[1]Р.У. Мукашева, [1]Ш.Т. Тезекпаева✉, [2]Б. Кәрімқызы, [3]Е.А. Малгаждаров, [3]А.Н. Кубентаева

[1]«Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ, Өскемен, Қазақстан,
[2]«А-Медикал» ЖШС, Алматы, Қазақстан,
[3]«С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті» КЕАҚ, Өскемен, Қазақстан,
e-mail: ShTezekpaeva@edu.ektu.kz

Мақалада қант диабетінің дамуын болжау мысалында клиникалық шешімдерді қолдау тапсырмалары үшін нейрондық желілерді ансамбльдеу алгоритмі қарастырылады. Конволюциялық нейрондық желілерді (CNN), қайталанатын нейрондық желілерді (RNN) және ұзақ мерзімді қысқа мерзімді жады (LSTM) желілерін қамтитын модельдер ансамблін пайдалану жеке архитектураларды қолданумен салыстырғанда болжамдардың дәлдігі мен тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді. Болжамдарды біріктіру үшін Дирихлеттің таралуына негізделген Дирихлет ансамблі әдісі қолданылады, бұл әр модельге және деректердің белгісіздігіне сенімділікті ескере отырып, нәтижелердің икемді және бейімделгіш салмағын қамтамасыз етеді. Эксперименттер модельдердің сапасына салыстырмалы талдау жүргізді, онда RNN дәлдік, жауаптылық және F1 өлшемдері бойынша жақсы нәтижелер көрсетті. Ансамбльдік тәсіл болжамдардың сенімділігі мен тұрақтылығын жақсартты, бұл клиникалық шешімдер қабылдау және диагностикалық қателіктерді азайту үшін өте маңызды. Зерттеу шешімдерді қолдаудың цифрлық жүйелерін дамытуға ықпал ете отырып, нейрондық желі ансамбльдерін және медицинадағы ықтималдық біріктіру әдістерін қолданудың өзектілігін растайды. Жұмыстың практикалық маңыздылығы қант диабеті мен басқа да созылмалы

ауруларды диагностикалау сапасын арттыру үшін ұсынылған алгоритмді нақты медициналық ақпараттық жүйелерге біріктіру мүмкіндігінде жатыр. Әрі қарайғы зерттеулердің болашағы ансамбль архитектурасын кеңейтуді және адаптивті әдістерді қолдана отырып таразыны оңтайландыруды қамтиды.

Түйін сөздер: нейрондық желілерді ансамбльдеу, Дирихле тарату, CNN, RNN, LSTM, қант диабетін болжау.

АНСАМБЛИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУР НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИАБЕТА

[1]Р.У. Мукашева, [1]Ш.Т. Тезекпаева✉, [2]Б. Кәрімқызы, [3]Е.А. Малгаждаров, [3]А.Н. Кубентаева

[1]НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева»,Усть-Каменогорск, Казахстан,
[2]ТОО «А-Медикал», Алматы, Казахстан,
[3]НАО «Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова». Усть-Каменогорск, Казахстан,
e-mail: ShTezekpaeva@edu.ektu.kz

В статье рассматривается алгоритм ансамблирования нейронных сетей для задач поддержки клинических решений на примере прогнозирования развития диабета. Использование ансамбля моделей, включающего сверточные нейронные сети (CNN), рекуррентные нейронные сети (RNN) и сети с долговременной краткосрочной памятью (LSTM), позволяет повысить точность и устойчивость предсказаний по сравнению с применением отдельных архитектур. Для объединения предсказаний применяется метод Dirichlet Ensemble, основанный на распределении Дирихле, что обеспечивает гибкое и адаптивное взвешивание результатов с учётом доверия к каждой модели и неопределённости данных. В ходе экспериментов проведён сравнительный анализ качества моделей, в котором RNN показала лучшие результаты по метрикам точности, отзывчивости и F1-меры. Ансамблевый подход улучшил надёжность и стабильность прогнозов, что критически важно для принятия клинических решений и минимизации ошибок диагностики. Исследование подтверждает актуальность применения ансамблей нейронных сетей и методов вероятностного объединения в медицине, способствуя развитию цифровых систем поддержки принятия решений. Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции предложенного алгоритма в реальные медицинские информационные системы для повышения качества диагностики диабета и других хронических заболеваний. Перспективы дальнейших исследований включают расширение архитектур ансамбля и оптимизацию весов с использованием адаптивных методов.

Ключевые слова: ансамблирование нейронных сетей, распределение Дирихле, CNN, RNN, LSTM, прогнозирование диабета.

Introduction. The algorithm for ensemble neural network architectures in clinical decision support tasks is a method in which several different models are combined to improve the accuracy, stability, and reliability of the system [1-5]. This approach allows compensation for errors in individual networks and improving the final results by combining their predictions. In the context of clinical decisions, this is particularly important, as even minor errors in diagnosis or prognosis can have serious consequences.

The decision support system for diabetes prediction uses an ensemble that includes:

- convolutional neural networks (CNN) [6];
- recurrent neural networks (RNN) [7];
- long short-term memory (LSTM) networks [8].

The combined use of CNN, RNN, and LSTM predictions improves forecast accuracy and contributes to a more reliable determination of a patient' s likelihood of developing diabetes.

Modern medicine faces the need to improve the accuracy and reliability of clinical decisions, especially in the diagnosis of chronic diseases such as diabetes. Despite the development of machine learning and neural network methods, the accuracy

of individual models remains insufficient due to the high heterogeneity and noise of medical data. This has led to the need to find more effective approaches to information processing and disease prediction.

Ensembling neural network architecture is one of the promising areas in medical analytics, as it allows combining the advantages of different models and compensating for their weaknesses. An analysis of recent studies [1–5] shows recognition of the significance of this approach, but the use of Dirichlet distribution for optimal weighting of ensemble predictions in the context of clinical decision support has not been sufficiently studied.

The object of the study is the process of clinical decision support using machine learning methods. The subject is an algorithm for ensemble neural networks using Dirichlet distribution to improve the accuracy of diabetes prediction.

The aim of the study is to develop and test a method for ensemble neural networks (CNN, RNN, LSTM) using Dirichlet Ensemble to improve the quality of diabetes predictions.

The research objectives include:

1. analysis of existing ensemble methods in medicine;

2. development of a Dirichlet Ensemble model for combining predictions;

3. training and testing neural network models on medical data;

4. evaluation of the effectiveness of the ensemble compared to individual models.

The research methods used are machine learning, deep learning, statistical analysis, and hyperparameter optimization. It is assumed that the use of Dirichlet Ensemble will improve the accuracy and stability of forecasts by adequately accounting for uncertainty and the contribution of each model.

The theoretical significance lies in expanding the scope of ensemble methods in medical diagnostics, demonstrating the effectiveness of using Dirichlet distribution to weight predictions from different neural network architectures.

The practical significance lies in improving the accuracy and reliability of clinical decision support systems, which is especially important in the diagnosis of chronic diseases such as diabetes. The developed algorithm can be integrated into medical information systems to improve the quality of diagnosis, which helps reduce the risk of medical errors and improve patient outcomes.

In addition, the study opens prospects for further research on adaptive ensemble optimization and expanding the range of models used, which contributes to the development of personalized medicine and the digital transformation of healthcare.

Materials and methods. Within the framework of this study, the DirichletEnsemble class is used for coordinated ensemble work, which uses the Dirichlet distribution to calculate the optimal weights of models, taking into account their individual performance indicators [9]. The Dirichlet distribution is a multidimensional generalization of the beta distribution and is used to model the probabilities of several categories, such as classes in classification tasks, which allows describing the probability distribution for K classes.

Let us denote the probability for each of the K classes by $p1, p2, \dots, K$, where $p1+p2 \dots+\dots pK = 1$. The Dirichlet distribution for a K-dimensional probability vector is given by the following formula (1) [10]:

$$P\left(p_1, p_2, \dots, p_K \middle| \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K\right) = \frac{\Gamma(\sum_{i=1}^{K} \alpha_i)}{\prod_{i=1}^{K} \Gamma(\alpha_i)} \prod_{i=1}^{K} p_i^{\alpha_i - 1} \quad (1)$$

where $\alpha 1, \alpha 2, \dots, \alpha K$ are hyperparameters, U is the gamma function, which is a generalization of the factorial.

Let there be N models, each of which predicts the probabilities of an object belonging to classes $p1, p2, \dots, pk$ for the i-model, where $i = 1, 2, \dots N$.

Using the Dirichlet Ensemble method, these predictions can be combined using a posteriori distribution, which is modeled as a Dirichlet distribution [11].

To aggregate the predictions of each model, we use the Dirichlet posterior distribution. The probabilities for each class j in the final prediction can be written as a model represented by formula (2) [12]:

$$p_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} \alpha_i * p_{ij}}{\sum_{i=1}^{N} \alpha_i} \quad (2)$$

where: pij is the predicted probability of class j by model i, αi is the weight (or hyperparameter) that adjusts the contribution of model i to the final prediction.

The hyperparameters $\alpha 1, \alpha 2, \ldots, \alpha K$ can be updated based on the posterior distribution or through optimization methods such as gradient descent. These parameters can be interpreted as posterior confidence probabilities for each model.

The main idea is that the Dirichlet distribution generates probability distributions for classes, thereby modeling uncertainty in predictions.

Dirichlet Ensemble can be applied to medical data where there is uncertainty in the predictions of different models. For example, when classifying diagnoses based on test results, several models may give different predictions, and using the Dirichlet distribution method will allow these predictions to be combined more accurately, taking into account the uncertainty of each model and its contribution.

As shown in Figure 1, one of the steps in the algorithm for ensemble neural network architectures for clinical decision support tasks is the use of Dirichlet Ensemble to combine models.

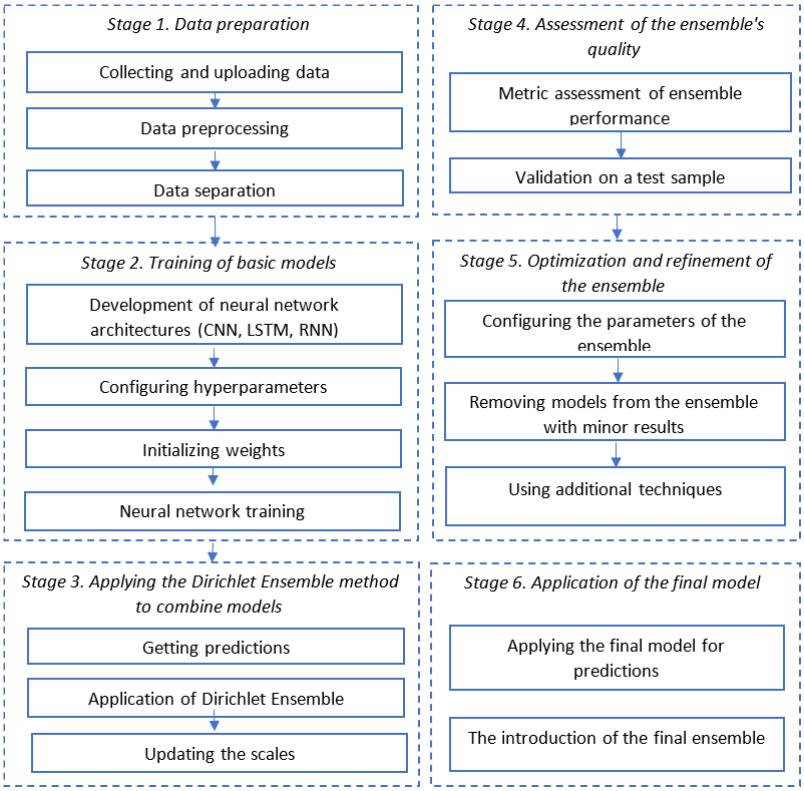


Fig.1 - Algorithm for ensemble learning of neural network architectures for clinical decision support tasks

In an ensemble of clinical decision support task classifiers, each model predicts the probability of an object belonging to a particular class. Dirichlet Ensemble combines predictions in a way that

takes uncertainty into account and distributes prediction probabilities among classes based on a posteriori distribution constructed from a Dirichlet distribution. The weights assigned to each model' s predictions are based on the Dirichlet distribution, which allows for more flexible and efficient aggregation of results.

The following advantages of ensemble learning for clinical decisions can be highlighted:

− ensemble learning reduces prediction error, as the weaknesses of one model can be compensated for by another model;

− models trained in different data subsamples or using different architectures may be more robust to noise in medical data;

− ensemble learning improves the overall reliability of predictions, which is critical for clinical decision-making, especially in life-threatening situations.

This approach makes the system more flexible and robust, which is important in the context of high uncertainty and heterogeneity of medical data.

Results and discussion. During data preparation, the samples are divided into training and test sets. The data is adapted for CNN, and the target variables are encoded using one-hot encoding. The CNN architecture includes two convolutional layers with pooling, a Flatten layer, fully connected layers with Dropout, and a softmax output for two classes. Training with categorical cross-entropy and Adam is accompanied by validation on the test sample. The results are evaluated using loss and accuracy graphs (Fig.2).

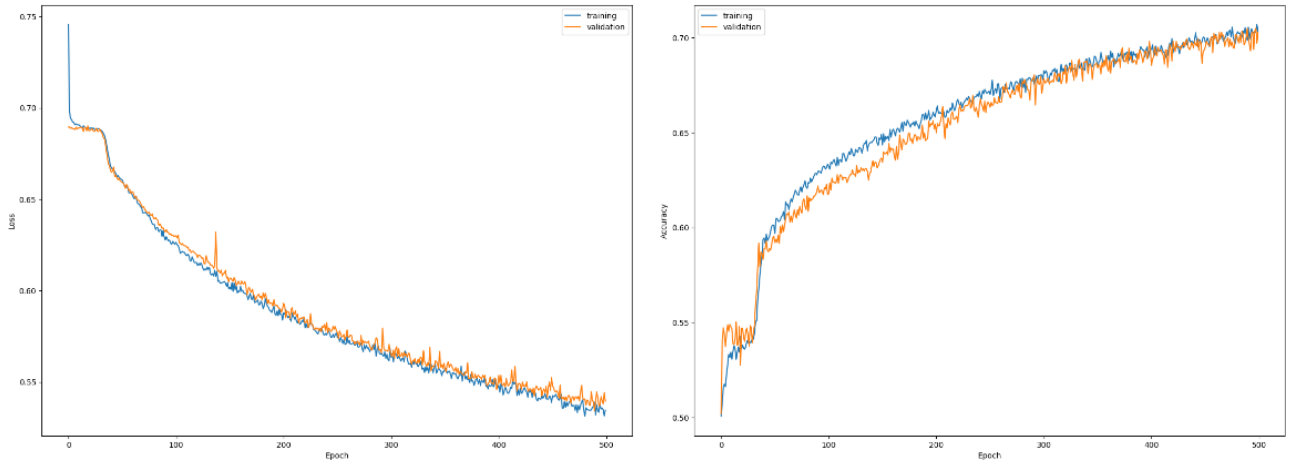


Fig.2 - Loss and accuracy graphs

CNN classification report in Table 1.

Table 1 - CNN classification report

Position	Precision	Recall	f1-score	Number of samples
False	0.66	0.82	0.73	4782
True	0.77	0.59	0.66	4800
macro avg	0.72	0.70	0.70	9582
weighted avg	0.72	0.70	0.70	9582

The CNN error matrix is represented by formula (3):

$$\begin{bmatrix} [3926\ 856] \\ [1988\ 2812] \end{bmatrix} \quad (3)$$

CNN achieved macro F1 = 0.70; instability is observed during validation.

LSTM uses input sequences of 38 steps, 50 hidden neurons, fully connected layers with ReLU and Dropout, Adam (lr=0.001), 500 epochs, batch = 512. The loss and accuracy graphs (Fig.3.37) show an increase in accuracy to ~65% without significant overfitting. Macro F1 = 0.69.

The LSTM classification report is in Table 3.9, and the error matrix is in formula (2).

Table 2 - Classification report for the LSTM model

Position	Precision	Recall	f1-score	Number of samples
False	0.67	0.74	0.70	4782
True	0.71	0.64	0.67	4800
macro avg	0.69	0.69	0.69	9582
weighted avg	0.69	0.69	0.69	9582

The LSTM error matrix is represented by formula (4):

$$\begin{bmatrix} [3521\ 1261] \\ [1725\ 3075] \end{bmatrix} \quad (4)$$

As shown in Figure 3, the accuracy graph demonstrates that both the training and validation sets show an increase, stabilizing at around 65%. This gradual increase and stabilization indicate that the model benefits from long-term training without significant overfitting, as the validation accuracy closely follows the training accuracy.

The RNN is built on SimpleRNN (50 neurons) with fully connected layers, ReLU, and softmax. Training with Adam (0.001) demonstrates a decrease in losses and an increase in accuracy (Fig.4), but with fluctuations in validation. Macro F1 = 0.73, overall accuracy — 74% (Table 3.10), better determines the False class.

The accuracy graph shown in Figure 3.38 reflects that the accuracy on the training data gradually increases, which is good for model training. However, the accuracy on the validation data, although increasing, shows some instability, which may be a sign of overfitting or insufficient generalization ability of the model.

The classification report for the RNN model is presented in Table 3.

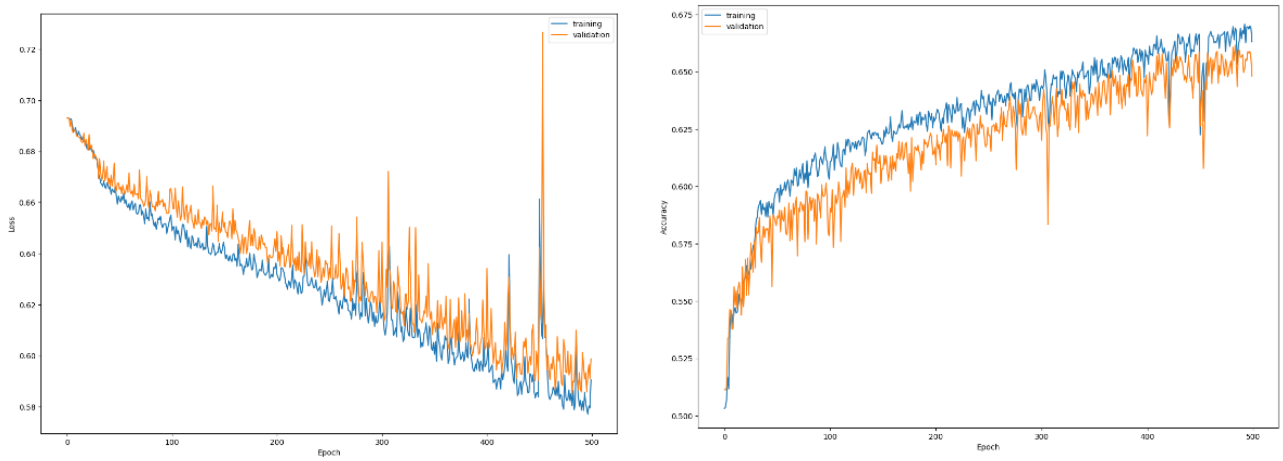


Fig.3 - Loss and accuracy graphs for the LSTM model

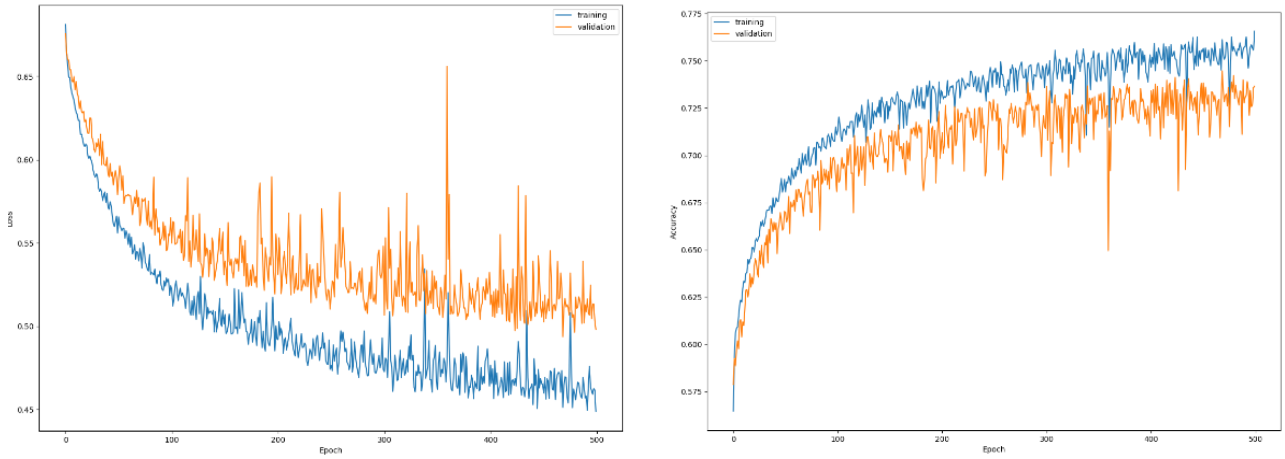


Fig.4 - Loss and accuracy graphs for the RNN model

Table 3 - Classification report for the RNN model

Position	Precision	Recall	f1-score	Number of samples
False	0.70	0.81	0.75	4782
True	0.78	0.66	0.71	4800
macro avg	0.74	0.73	0.73	9582
weighted avg	0.74	0.73	0.73	9582

The RNN error matrix is represented by formula (3.3):

$$\begin{bmatrix} [3884\ 898] \\ [1646\ 3154] \end{bmatrix} \quad (5)$$

In the study of ensemble methods (Decision Tree, AdaBoost, Random Forest, Extra Trees, Gradient Boosting), gaps were filled with medians, and cross-validation was used (Fig.5, 3.40). AdaBoost showed the highest average accuracy of 0.915, while Gradient Boosting showed the worst result.

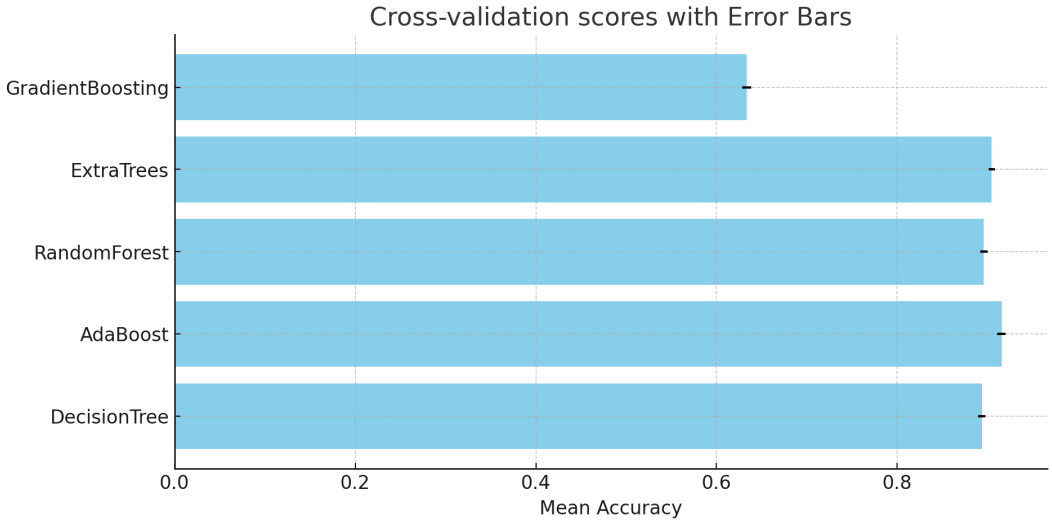


Fig.5 - Results of cross-validation of machine learning algorithms

Hyperparameter optimization using GridSearchCV and EstimatorSelectionHelper revealed GradientBoostingClassifier as the leader in terms of max_score (Fig.6).

	estimator	min_score	mean_score	max_score	std_score	learning_rate	max_depth	max_features	n_estimators
41	GradientBoostingClassifier	0.910952	0.914678	0.917058	0.00266821	NaN	9	auto	500
37	GradientBoostingClassifier	0.874507	0.876104	0.877888	0.00138689	NaN	7	auto	500
39	GradientBoostingClassifier	0.866804	0.870875	0.874319	0.0030996	NaN	9	sqrt	500
40	GradientBoostingClassifier	0.861732	0.866491	0.873943	0.00533642	NaN	9	auto	200
36	GradientBoostingClassifier	0.799361	0.809569	0.81796	0.00770064	NaN	7	auto	200
38	GradientBoostingClassifier	0.797577	0.802774	0.812324	0.00676151	NaN	9	sqrt	200
33	GradientBoostingClassifier	0.787808	0.793037	0.803119	0.00713072	NaN	5	auto	500
35	GradientBoostingClassifier	0.792316	0.79504	0.798892	0.00280016	NaN	7	sqrt	500
32	GradientBoostingClassifier	0.714071	0.723402	0.739339	0.011324	NaN	5	auto	200
34	GradientBoostingClassifier	0.724497	0.730603	0.739245	0.00628198	NaN	7	sqrt	200
31	GradientBoostingClassifier	0.70928	0.715386	0.71858	0.00431883	NaN	5	sqrt	500
29	GradientBoostingClassifier	0.677156	0.687927	0.694345	0.00766274	NaN	3	auto	500
30	GradientBoostingClassifier	0.66269	0.671301	0.681007	0.00751782	NaN	5	sqrt	200
17	RandomForestClassifier	0.664475	0.669798	0.67894	0.00649393	NaN	9	NaN	500
16	RandomForestClassifier	0.661845	0.668671	0.678753	0.00727648	NaN	9	NaN	200
28	GradientBoostingClassifier	0.646158	0.651919	0.659215	0.00543959	NaN	3	auto	200
27	GradientBoostingClassifier	0.631881	0.643653	0.652452	0.0086575	NaN	3	sqrt	500
24	ExtraTreesClassifier	0.639019	0.643966	0.652076	0.00578036	NaN	9	NaN	200
25	ExtraTreesClassifier	0.641368	0.645062	0.651418	0.00451417	NaN	9	NaN	500
15	RandomForestClassifier	0.630378	0.638111	0.649258	0.00807682	NaN	7	NaN	500
14	RandomForestClassifier	0.634135	0.639959	0.649164	0.00658507	NaN	7	NaN	200
3	DecisionTreeClassifier	0.63282	0.640522	0.645501	0.00552365	NaN	9	NaN	NaN
26	GradientBoostingClassifier	0.626245	0.630315	0.636295	0.00431974	NaN	3	sqrt	200
23	ExtraTreesClassifier	0.611497	0.619701	0.633853	0.0100495	NaN	7	NaN	500
22	ExtraTreesClassifier	0.60774	0.615662	0.628687	0.0092818	NaN	7	NaN	200
13	RandomForestClassifier	0.609243	0.616601	0.628311	0.00837079	NaN	5	NaN	500
12	RandomForestClassifier	0.605298	0.615787	0.627841	0.00926975	NaN	5	NaN	200
2	DecisionTreeClassifier	0.602574	0.609807	0.618354	0.00650916	NaN	7	NaN	NaN
9	AdaBoostClassifier	0.602386	0.60702	0.614785	0.00552489	0.1	NaN	NaN	500
10	RandomForestClassifier	0.583693	0.596374	0.611028	0.011246	NaN	3	NaN	200
21	ExtraTreesClassifier	0.590269	0.597564	0.610652	0.00927483	NaN	5	NaN	500

Fig.6 - Summary of GridSearchCV execution results

Hyperparameter optimization using GridSearchCV and EstimatorSelectionHelper revealed GradientBoostingClassifier as the leader in terms of max_score (Fig.6).

Model	Train Accuracy	Test Accuracy	Precision	Recall	F1 Score
DecisionTree	0.658347	0.641202	0.684453	0.526458	0.595148
AdaBoost	0.590222	0.585055	0.623501	0.433333	0.511308
RandomForest	0.688853	0.671467	0.696948	0.608958	0.649989
ExtraTrees	0.658481	0.643394	0.671887	0.563125	0.612717
GradientBoosting	0.958356	0.916301	0.970132	0.859375	0.911401

Fig.7 - Results of evaluating various machine learning classifiers

A comparative graph of metrics is shown in Fig.8.

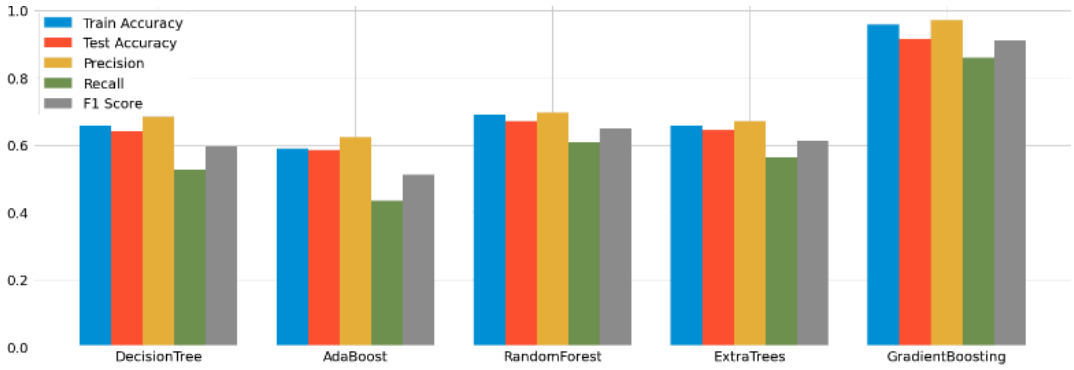


Fig.8 - Comparison chart of various quality metrics for selected machine learning algorithms

The LSTM and RNN ensemble (DirichletEnsemble) distributes weights according to ROC AUC and combines predictions. The graphs (Fig.9) show an increase in accuracy during training and fluctuations during validation.

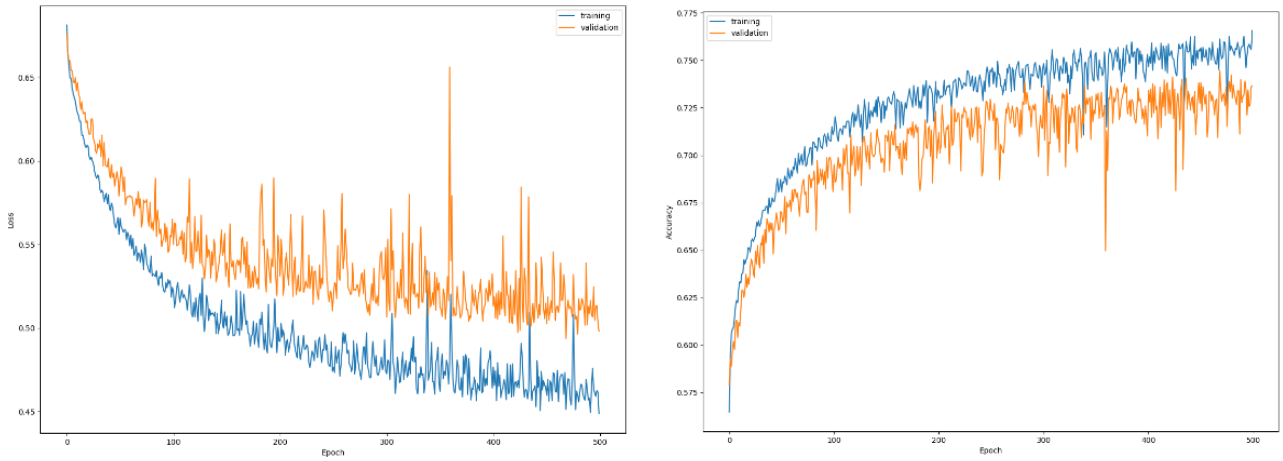


Fig.9 - Graph of losses and accuracy of ensemble training of LSTM and RNN models

Based on the results presented above, we can conclude that RNN outperformed all other models based on deep neural networks that were built. Compared to other models, RNN has the highest average accuracy, responsiveness, and f1-score, exceeding 0.74. The RNN model uses four hidden layers to maintain simplicity and increase reliability during retraining. The hidden layers use the ELU activation function along with standard kernel initializers. A sigmoid activation function is used at the output level for prediction. This approach is consistent with scientific methodology, while remaining accessible to understanding.

Conclusion. The study confirmed the effectiveness of neural network ensembles in clinical decision support tasks. Combining different architectures (CNN, RNN, LSTM) within the Dirichlet Ensemble compensated for the weaknesses of individual models and improved the accuracy of diabetes prediction. The Dirichlet distribution method provided flexible weighting of predictions, considering the confidence in each model and the uncertainty of the results.

A comparative analysis showed that among the individual architectures, RNN demonstrated the best performance (macro F1 > 0.74), which is associated with its ability to effectively process temporal dependencies in data. Among the classical ensemble algorithms, GradientBoostingClassifier demonstrated the highest accuracy.

In general, the use of ensemble strategies in medical decision support systems increases the reliability of predictions and resistance to noise, which is especially important in the diagnosis of diseases. A promising direction for further work is to expand the set of architectures in the ensemble, optimize weights using adaptive methods, and integrate the proposed system into real clinical scenarios.

References

1. Vincent A. C. S. R., Sengan S. Edge computing-based ensemble learning model for health care decision systems//Scientific Reports. -2024.-Vol.14(1):26997. DOI 10.1038/s41598-024-78225-5.

2. Bouazizi S., Ltifi H. Enhancing accuracy and interpretability in EEG-based medical decision making using an explainable ensemble learning framework application for stroke prediction //Decision Support Systems.- 2024. -Vol.178:114126. DOI 10.1016/j.dss.2023.114126.

3. Al Reshan M. S. et al. An innovative ensemble deep learning clinical decision support system for diabetes prediction //IEEE Access. -2024.-Vol.12.-P.106193-106210. DOI 10.1109/ACCESS.2024.3436641.

4. Barazanchi I. I. A. et al. Optimizing the Clinical Decision Support System (CDSS) by Using Recurrent Neural Network (RNN) Language Models for Real-Time Medical Query Processing //Computers, Materials & Continua. - 2024.- Vol.81(3). - P.4787-4832. DOI 10.32604/cmc.2024.055079.

5. Rane N., Choudhary S. P., Rane J. Ensemble deep learning and machine learning: applications, opportunities, challenges, and future directions //Studies in Medical and Health Sciences. – 2024. - Vol.1(2). - P.18-41. DOI 10.48185/smhs.v1i2.1225.

6. Zhao X. et al. A review of convolutional neural networks in computer vision //Artificial Intelligence Review.- 2024.- Vol.57(4):99. DOI 10.1007/s10462-024-10721-6.

7. Mienye I. D., Swart T. G., Obaido G. Recurrent neural networks: A comprehensive review of architectures, variants, and applications //Information. -2024.-Vol.15(9):517. DOI 10.3390/info15090517

8. Malashin I. et al. Applications of Long Short-Term Memory (LSTM) Networks in Polymeric Sciences: A Review //Polymers.-2024.-Vol.16(18):2607. DOI 10.3390/polym16182607.

9. Mouhafid M. et al. A Robust Approach to Early Glaucoma Identification from Retinal Fundus Images using Dirichlet-based Weighted Average Ensemble and Bayesian Optimization //Current Medical Imaging. - 2025. -Vol.21:27 DOI 10.2174/0115734056335762250128095107.

10. Zrelli I. et al. Drone applications in logistics and supply chain management: a systematic review using latent Dirichlet allocation //Arabian Journal for Science and Engineering. - 2024. – Vol.49. (9). -P.12411-12430. DOI 10.1007/s13369-023-08681-0.

11. Jazairy A. et al. Drones in last-mile delivery: a systematic literature review from a logistics management perspective //The International Journal of Logistics Management. - 2025.-Vol.36(7). - P.1-62. DOI 10.1108/IJLM-04-2023-0149.

12. Eser M. et al. Using pretrained models in ensemble learning for date fruits multiclass classification //Journal of Food Science. -2025-Vol.90(3): e70136. DOI 10.1111/1750-3841.70136.

Information about authors

Mukasheva R. - Candidate of Technical Science, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University; Oskemen, Kazakhstan, e-mail: rmukasheva@edu.ektu.kz.

Tezekpaeva Sh. - PhD student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: shtezekpaeva@edu.ektu.kz;

Karimkyzy B. - master, LLP «A-Medical», Almaty, Kazakhstan, e-mail: bekzatastana@gmail.com.

Malgazharov Ye. - Candidate of Physico-Mathematical Sciences, S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: malgazhdarov_e@mail.ru.

Kubentayeva S.– Candidate of Pedagogical Sciences, S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: saniya_kub@mail.ru.

Сведения об авторах

Мукашева Р.У.- кандидат физико-математических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: rmukasheva@edu.ektu.kz;

Тезекпаева Щ.Т. - докторант, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: shtezekpaeva@edu.ektu.kz;

Кәрімқызы Б. - PhD, ТОО «А-Медикал», Алматы, Казахстан, e-mail: bekzatastana@gmail.com;

Малгаждаров Е.А. – кандидиат физико-математических наук, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: malgazhdarov_e@mail.ru.

Кубентаева С.Н.- кандидиат педагогических наук, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: saniya_kub@mail.ru.

МРНТИ 50.49.37 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1499**

РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ МОНИТОРИНГА В СТРУКТУРЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РЕГИОНА

[1]Е.Ш. Утюбаев, [2]А.В. Шапорева✉, [3]О.В. Григоренко, [4]Р.А. Ельтинова, [5]А.К. Джакипбаев

[1]КГУ «Павлодарский областной центр информационных технологий» управления образования Павлодарской области, Павлодар, Казахстан,
[2]НАО «Северо-Казахстанский университет им. Манаша Козыбаева», Петропавловск, Казахстан,
[3]Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия,
[4]Павлодарский педагогический университет им. Әлкей Марғұлан, Павлодар, Казахстан,
[5]УО Павлодарской области, СОШ им. Абая, Аксу, Казахстан

✉ *Корреспондент-автор: annvolkova@mail.ru*

В условиях цифровой трансформации системы среднего образования возрастает потребность в создании информационно-аналитических инструментов, обеспечивающих мониторинг и управляемость материально-технической базы образовательных организаций. Традиционные механизмы отчётности не позволяют оперативно выявлять дисбалансы обеспеченности и оценивать риски деградации инфраструктуры на уровне региона. В работе представлена разработка аналитической панели мониторинга в структуре информационно-аналитической системы оценки материальной обеспеченности образовательных организаций региона.

Предложенная система основана на иерархической модели, включающей уровень школы и уровень региона, и интегрирует нормативно-ориентированную и риск-ориентированную оценку состояния ресурсов. В качестве методологической основы использованы системный, архитектурный и индексный подходы, а также технологии бизнес-аналитики (BI) для реализации интерактивной визуализации данных. Математическая модель обеспечивает формирование интегрального индекса обеспеченности и корректную агрегацию показателей при переходе от уровня образовательной организации к региональному уровню.

Разработанная аналитическая панель реализует принципы управленческой ориентированности интерфейса, когнитивной наглядности и иерархической декомпозиции данных. На уровне школы обеспечивается детализированный анализ категорий оборудования и состояния ресурсов, на уровне региона — стратегическая оценка распределения обеспеченности, выявление критических зон и пространственная визуализация дисбалансов.

Результаты апробации демонстрируют возможность трансформации математической модели в удобный инструмент поддержки принятия решений. Разработанная панель обеспечивает переход от отчётного представления данных к управляемому мониторингу образовательной инфраструктуры и может быть использована как элемент цифровой экосистемы управления образованием региона.

Ключевые слова: иерархическая модель, риск-ориентированная модель, материальная обеспеченность, нормативное моделирование, мониторинг образовательной инфраструктуры, система поддержки принятия решений, аналитическая панель.

ӨҢІРДІҢ БІЛІМ БЕРУ ҰЙЫМДАРЫНЫҢ МАТЕРИАЛДЫҚ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТІЛУІН БАҒАЛАУДЫҢ АҚПАРАТТЫҚ-ТАЛДАМАЛЫҚ ЖҮЙЕСІНІҢ ҚҰРЫЛЫМЫНДА МОНИТОРИНГТІҢ ТАЛДАМАЛЫҚ ПАНЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

[1]Е.Ш. Утюбаев, [2]А.В. Шапорева✉, [3]О.В. Григоренко, [4]Р.А. Ельтинова, [5]А.К. Джакипбаев

[1]Павлодар облыстық білім беру департаментінің Павлодар аймақтық ақпараттық технологиялар орталығы, Павлодар, Қазақстан,

[2]Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан,
[3]Сібір мемлекеттік геожүйелер және технологиялар университеті, Новосибирск, Ресей,
[4]Әлкей Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан,
[5]Павлодар облысының білім беру басқармасы, Абай атындағы жалпы орта білім беру мектебі, Аксу, Қазақстан,
e-mail: annvolkova@mail.ru

Орта білім беру жүйесінің цифрлық трансформациясы жағдайында білім беру ұйымдарының материалдық-техникалық базасының мониторингі мен басқарылуын қамтамасыз ететін ақпараттық-талдамалық құралдарды құру қажеттілігі артып келеді. Дәстүрлі есеп беру тетіктері қамтамасыз етудегі теңгерімсіздіктерді жедел анықтауға және аймақ деңгейінде инфрақұрылымның тозу тәуекелдерін бағалауға мүмкіндік бермейді. Жұмыста өңірдің білім беру ұйымдарының материалдық қамтамасыз етілуін бағалаудың ақпараттық-талдамалық жүйесінің құрылымында мониторингтің Талдамалық панелін әзірлеу ұсынылған.

Ұсынылған жүйе мектеп деңгейі мен аймақ деңгейін қамтитын иерархиялық модельге негізделген және ресурстардың жай-күйін нормативті және тәуекелге бағытталған бағалауды біріктіреді. Әдістемелік негіз ретінде деректерді интерактивті визуализациялауды жүзеге асыру үшін жүйелік, архитектуралық және индекстік тәсілдер, сондай-ақ бизнес-аналитика (BI) технологиялары пайдаланылды. Математикалық модель білім беру ұйымының деңгейінен өңірлік деңгейге өту кезінде қамтамасыз етудің интегралды индексін қалыптастыруды және көрсеткіштердің дұрыс агрегациясын қамтамасыз етеді.

Әзірленген аналитикалық панель интерфейстің басқарушылық бағдарлану, когнитивті көрнекілік және деректердің иерархиялық ыдырау принциптерін жүзеге асырады. Мектеп деңгейінде жабдықтар санаттары мен ресурстардың жай — күйін егжей-тегжейлі талдау, аймақ деңгейінде-қамтамасыз етуді бөлуді стратегиялық бағалау, Сыни аймақтарды анықтау және теңгерімсіздіктерді кеңістіктік визуализациялау қамтамасыз етіледі.

Апробация нәтижелері математикалық модельді шешім қабылдауды қолдаудың ыңғайлы құралына айналдыру мүмкіндігін көрсетеді. Әзірленген панель есепті деректерді ұсынудан білім беру инфрақұрылымының басқарылатын мониторингіне көшуді қамтамасыз етеді және аймақтың білім беруді басқарудың цифрлық экожүйесінің элементі ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: иерархиялық модель, тәуекелге бағытталған модель, материалдық қауіпсіздік, нормативтік модельдеу, білім беру инфрақұрылымын бақылау, шешімдерді қолдау жүйесі, аналитикалық панель.

DEVELOPMENT OF AN ANALYTICAL MONITORING PANEL IN THE STRUCTURE OF AN INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR ASSESSING THE FINANCIAL SECURITY OF EDUCATIONAL INSTITUTIONS IN THE REGION

[1]Ye.Sh. Utyubaev, [2]A.V. Shaporeva✉, [3]O.V. Grigorenko, [4]R.A. Yeltinova, [5]A.K. Dzhakipbaev

[1]KSU Pavlodar Regional Center of Information Technologies of the Department of Education of Pavlodar Region, Pavlodar, Kazakhstan,
[2]NAO Manash Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan,
[3]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia,
[4]Alkey Margulan Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, Kazakhstan,
[5]Educational institution of Pavlodar region, Abaya secondary school, Aksu, Kazakhstan,
e-mail: annvolkova@mail.ru

In the context of the digital transformation of the secondary education system, there is an increasing need to create information and analytical tools that ensure monitoring and manageability of the material and technical base of educational organizations. Traditional reporting mechanisms do not allow us to quickly identify security imbalances and assess the risks of infrastructure degradation at the regional level.

The paper presents the development of an analytical monitoring panel in the structure of an information and analytical system for assessing the financial security of educational institutions in the region.

The proposed system is based on a hierarchical model that includes the school level and the regional level, and integrates a regulatory-oriented and risk-oriented assessment of the state of resources. The methodological framework uses system, architectural, and index approaches, as well as business intelligence (BI) technologies to implement interactive data visualization. The mathematical model ensures the formation of an integral index of security and the correct aggregation of indicators during the transition from the level of an educational organization to the regional level.

The developed analytical panel implements the principles of management-oriented interface, cognitive visibility and hierarchical data decomposition. At the school level, a detailed analysis of equipment categories and resource status is provided; at the regional level, a strategic assessment of the distribution of provision, identification of critical areas, and spatial visualization of imbalances.

The results of the testing demonstrate the possibility of transforming the mathematical model into a convenient decision support tool. The developed panel provides a transition from reporting data to managed monitoring of the educational infrastructure and can be used as an element of the digital ecosystem of education management in the region.

Keywords: hierarchical model, risk-oriented model, material security, normative modeling, educational infrastructure monitoring, decision support system, analytical panel.

Введение. Современное развитие системы среднего образования сопровождается ростом требований к качеству образовательной инфраструктуры, прозрачности управления и эффективности использования материальных ресурсов. В условиях регионального управления особую актуальность приобретает задача системного мониторинга обеспеченности образовательных организаций оборудованием, специализированными кабинетами, цифровыми средствами обучения и иными материальными ресурсами.

Традиционные подходы к учёту материально-технической базы школ, основанные на периодической отчётности и инвентаризации, не обеспечивают оперативности анализа и не позволяют выявлять дисбалансы в обеспеченности на уровне города, села и региона в целом. Отсутствие централизованной аналитической платформы затрудняет принятие управленческих решений, связанных с распределением финансирования, планированием модернизации инфраструктуры и предупреждением рисков деградации оборудования.

В условиях цифровой трансформации образования возрастает необходимость внедрения информационно-аналитических систем, обеспечивающих:

- консолидацию данных от образовательных организаций;

- автоматизированный расчёт показателей обеспеченности;

- сопоставимость данных на различных уровнях управления;

- визуализацию ключевых индикаторов для руководителей школ и региона;

- поддержку сценарного анализа и стратегического планирования.

Целью исследования статьи является разработка аналитической панели мониторинга в структуре информационно-аналитической системы оценки материальной обеспеченности образовательных организаций региона, обеспечивающей иерархическую визуализацию показателей на уровне школы и региона и поддержку управленческих решений различного масштаба.

Объектом исследования в данной статье выступают образовательные организации среднего образования региона, рассматриваемые как элементы единой иерархической системы управления.

Научная новизна исследования заключается в

разработке концепции и архитектуры иерархической аналитической панели мониторинга материальной обеспеченности образовательных организаций, интегрированной в информационно-аналитическую систему регионального уровня.

Литературный обзор. Вопрос цифровизации управления образовательными системами в последние годы активно рассматривается в научной литературе. Исследования показывают, что переход к информационно-аналитическим системам позволяет повысить прозрачность, управляемость и обоснованность решений в сфере образования [1,2].

Международные организации подчёркивают необходимость использования данных для стратегического управления образованием. В отчётах OECD [1] и Всемирного банка [2] отмечается, что современные образовательные системы должны переходить от отчётной модели управления к аналитической, основанной на мониторинге показателей и визуализации ключевых индикаторов. Особое внимание уделяется созданию цифровых платформ, обеспечивающих сопоставимость данных на различных уровнях управления.

Исследования в области Learning Analytics демонстрируют значимость аналитических инструментов для поддержки управленческих решений в образовании [3]. Авторы отмечают, что визуализация данных играет ключевую роль в интерпретации сложных показателей и снижении когнитивной нагрузки на пользователей системы.

Работы, посвящённые системам поддержки принятия решений (Decision Support Systems), подчёркивают необходимость интеграции математических моделей и инструментов визуализации [4]. Современные DSS ориентированы не только на вычисление показателей, но и на их представление в форме, удобной для управленческого анализа.

В области управления инфраструктурой и ресурсами активно развиваются риск-ориентированные подходы [5], позволяющие учитывать деградацию оборудования и прогнозировать необходимость модернизации. Однако большинство исследований сосредоточено на технических системах, тогда как образовательная инфраструктура требует адаптации подобных методов к специфике социальной сферы.

Отдельное направление связано с разработкой региональных систем мониторинга и иерархической агрегации показателей [6]. Авторы подчёркивают, что эффективная система управления должна обеспечивать согласование локальных и стратегических уровней анализа.

Исследования в сфере бизнес-аналитики и визуализации данных подтверждают, что правильно спроектированные аналитические панели способствуют повышению качества управленческих решений [7, 8]. Визуальные инструменты позволяют выявлять скрытые закономерности, ранжировать объекты и формировать приоритеты развития.

В работах, посвящённых цифровой трансформации образования [9, 10], подчёркивается необходимость создания интегрированных информационно-аналитических платформ, обеспечивающих мониторинг материальных, кадровых и образовательных ресурсов.

Несмотря на значительный объём исследований в области образовательной аналитики, недостаточно разработанным остаётся вопрос проектирования иерархических аналитических панелей, интегрирующих нормативную и риск-ориентированную оценку материальной обеспеченности образовательных организаций в едином визуальном пространстве. Важно отметить то, что невзирая на активное развитие образовательной аналитики, большинство исследований сосредоточено на анализе учебных результатов, тогда как инфраструктурная составляющая визуализируется фрагментарно.

Таким образом, анализ литературы подтверждает актуальность разработки аналитической панели мониторинга, интегрированной в информационно-аналитическую систему регионального уровня и ориентированной на поддержку управленческих решений.

Материалы и методы. В качестве эмпириче-

ской базы использованы данные о материально-техническом обеспечении образовательных организаций региона, включающие: сведения о количестве и состоянии оборудования; нормативные требования к обеспеченности по категориям ресурсов; численность обучающихся; информацию о сроках эксплуатации и степени износа оборудования.

При проектировании информационно-аналитической системы использованы следующие подходы:

Системный подход - позволил формализовать структуру данных и определить механизмы агрегирования показателей обеспеченности.

Архитектурный подход - позволил спроектировать систему на основе трёхуровневой архитектуры (логический, физический и программный уровни), обеспечивающей разделение данных и бизнес-логику, масштабируемость системы; возможность интеграции с существующими информационными ресурсами.

Нормативно-ориентированный подход - в основу оценки обеспеченности материальными ресурсами положено сопоставление фактического количества материальных ресурсов с установленными нормативами обеспеченности, что позволяет обеспечить объективность и сопоставимость показателей.

Риск-ориентированный подход - при формировании системы учтён фактор износа и деградации оборудования, что обеспечивает переход от статической оценки обеспеченности к динамическому мониторингу состояния материальной базы.

Индексный метод - для комплексной оценки использован интегральный индекс обеспеченности, формируемый на основе взвешенной агрегации показателей по категориям ресурсов.

Методы анализа данных и визуализации - для обработки и представления результатов применены технологии бизнес-аналитики (BI), обеспечивающие: автоматизированный расчёт показателей, формирование интерактивных дашбордов, поддержку сценарного анализа.

Разработанная методология позволила создать информационно-аналитическую систему, обеспечивающую комплексный мониторинг материальной обеспеченности образовательных организаций и поддержку управленческих решений на региональном уровне.

Математическая модель. Математическая модель информационно-аналитической системы мониторинга материальной обеспеченности образовательных организаций региона представлена моделью 1-го уровня для организации образования и моделью 2-го уровня - для оценки региона.

Формализация задачи. Рассмотрим множество образовательных организаций региона (1):

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \quad (1)$$

где n - количество школ региона.

Пусть каждая организация характеризуется набором категорий материальных ресурсов (2):

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}, \quad (2)$$

где m - число анализируемых категорий (компьютерное оборудование, интерактивные панели, лаборатории и т.д.).

Для каждой школы s и категории c вводятся следующие показатели:

$N_{fact}(c, s)$ - фактическое количества единиц ресурса;

$N_{norm}(c, s)$ - нормативная потребность;

$R(c, s) \in [0, 1]$ - коэффициент риска деградации (износ, срок эксплуатации).

Базовый коэффициент обеспеченности K определяется как отношение фактического значения к нормативному (3):

$$K(c, s) = \frac{N_{fact}(c, s)}{N_{norm}(c, s)} \quad (3)$$

Для исключения искусственного завышения индекса используется нормированное значение (4):

$$\widetilde{K}(c, s) = \min(1, K(c, s)), \quad (4)$$

Таким образом, превышение нормативов не приводит к росту интегрального показателя выше единицы.

Риск-ориентированная корректировка. Для учёта состояния оборудования вводится корректирующий множитель (5):

$$(1 - \lambda R(c, s)), \tag{5}$$

где:

$\lambda \in [0, 1]$ – параметр чувствительности к риску.

При $\lambda = 0$ модель сводится к нормативной оценке.

При $\lambda \to 1$усиливается влияние износа оборудования.

Интегральный индекс школы. Индекс обеспеченности школы I_s формируется как взвешенная сумма по категориям (6):

$$I_s = \sum_{c=1}^{m} \omega_c \widetilde{K}(c, s)(1 - \lambda R(c, s)), \tag{6}$$

где ω_c – вес категории оборудования, $\omega_c \geq 0$.

$$\sum_{c=1}^{m} \omega_c = 1 \tag{7}$$

Весовые коэффициенты определяются экспертно или нормативно. Показатель $I_s \in [0, 1]$.

Агрегация на уровне регона. Пусть P_s – численность обучающихся в школе s.Вес школы в региональной системе (8):

$$\gamma_s = \frac{P_s}{\sum_{i=1}^{n} P_i} \tag{8}$$

Региональный индекс определяется как (9):

$$I_{reg} = \sum_{s=1}^{n} \gamma_s I_s, \tag{9}$$

Такой механизм обеспечивает учёт масштаба образовательной организации при формировании итогового показателя. Интегральный индекс используется для:

- ранжирования образовательных организаций;

- выявления критических зон;

- формирования приоритетов модернизации;

- сценарного анализа изменения нормативов и параметра риска.

Предложенная модель имеет следующие свойства:

1. Ограниченность : $0 \leq I_s \leq 1$, $0 \leq I_{reg} \leq 1$.

2. Монотонность - при увеличении обеспеченности или снижении риска индекс возрастает.

3. Управляемость: параметр λ позволяет регулировать чувствительность системы к деградации ресурсов.

4. Иерархичность: модель обеспечивает корректную агрегацию показателей от уровня школы к уровню региона.

Таким образом, математическая модель служит формализованным ядром информационно-аналитической системы и обеспечивает переход от описательной отчётности к количественно обоснованному управлению материальными ресурсами.

Для обеспечения автоматизированной обработки данных, расчёта показателей обеспеченности и оценки риска деградации инфраструктуры в информационно-аналитической системе реализован алгоритм функционирования, обеспечивающий преобразование исходных данных в интегральные показатели и аналитические рекомендации для принятия управленческих решений.

Алгоритм охватывает полный цикл обработки информации: от загрузки исходных данных до визуализации результатов в аналитической панели мониторинга и формирования рекомендаций по модернизации материальной базы образовательных организаций.

Входными данными алгоритма являются:

- сведения о фактическом количестве оборудования по категориям;

- нормативы обеспеченности;

- численность обучающихся;

- срок эксплуатации оборудования;

- весовые коэффициенты категорий;

- параметр чувствительности системы к риску деградации.

Выходными данными алгоритма являются:

- коэффициенты обеспеченности по категориям;

- интегральный индекс обеспеченности образовательной организации;

- интегральный индекс обеспеченности региона;

- показатель дисбаланса обеспеченности;

- показатель риска деградации инфраструктуры;

- перечень критических образовательных организаций;

- рекомендации по обновлению и перераспределению ресурсов.

Схема алгоритма работы информационно-аналитической системы представлена на рисунке 1.

Выявление дисбаланса обеспеченности образовательных организаций осуществляется на основе анализа распределения интегрального индекса обеспеченности. Для этого выполняется ранжирование образовательных организаций по значению интегрального индекса и определяется доля организаций, находящихся в критической зоне обеспеченности. Дополнительно рассчитывается показатель неравномерности распределения обеспеченности, характеризующий степень дифференциации образовательных организаций по уровню материальной базы. На основе полученных показателей формируется перечень территорий и образовательных организаций, требующих приоритетного обновления материально-технической базы.

Оценка риска деградации инфраструктуры осуществляется на основе анализа срока эксплуатации оборудования и его нормативного срока службы. Интегральный риск образовательной организации определяется как взвешенная сумма рисков по категориям оборудования. Полученный показатель используется для прогнозирования выбытия оборудования и формирования планов модернизации материальной базы.



Рис.1 - Алгоритм работы информационно-аналитической системы оценки материальной обеспеченности образовательных организаций

Алгоритм реализован в структуре информационно-аналитической системы и включает следующие программные модули:

- модуль сбора и загрузки данных;

- модуль расчёта нормативной потребности;

- модуль расчёта показателей обеспеченности;

- модуль оценки риска деградации инфраструктуры;

- модуль агрегации показателей на уровне ре-

гиона;

- модуль аналитической визуализации.

Программная реализация выполнена с использованием реляционной базы данных PostgreSQL, рисунок 2, в которой реализованы процедуры расчёта показателей обеспеченности и риска деградации, а также инструменты бизнес-аналитики Power BI для визуализации результатов, ранжирования образовательных организаций, выявления критических зон и анализа дисбаланса обеспеченности.

```
Algorithm MaterialSupportAssessment

Input:
    S = {s1, s2, ..., sn} – множество образовательных организаций
    C = {c1, c2, ..., cm} – множество категорий оборудования
    Fsc – фактическое количество оборудования категории c в школе s
    Normc – норматив обеспеченности по категории c
    Ps – численность обучающихся в школе s
    Tsc – средний срок эксплуатации оборудования категории c в школе s
    Tmax,c – нормативный срок службы оборудования категории c
    wc – вес категории c
    λ – коэффициент чувствительности к риску

Output:
    Is – интегральный индекс обеспеченности школы
    Ireg – интегральный индекс обеспеченности региона
    Dcrit – перечень критических школ
    Rs – риск деградации инфраструктуры школы

Begin
```

Рис.2 - Программная реализация алгоритма работы информационно-аналитической системы оценки материальной обеспеченности образовательных организаций

Разработанный алгоритм был реализован в информационно-аналитической системе и использован при проектировании аналитической панели мониторинга образовательной организации и региона. Результаты работы алгоритма представлены в аналитических панелях, обеспечивающих визуализацию интегральных показателей обеспеченности, риска деградации инфраструктуры и территориальных дисбалансов обеспеченности.

Обсуждение и результаты. На основе предложенной математической модели были разработаны требования к аналитической панели мониторинга школы и аналитической панели мониторинга региона.

Проектирование аналитической панели мониторинга в структуре информационно-аналитической системы оценки материальной обеспеченности образовательных организаций региона осуществлялось с учётом управленческих задач различных уровней.

Аналитическая панель должна обеспечивать (общие требования):

- иерархичность отображения данных (школа - регион).

- сопоставимость показателей в динамике.

- выделение критических зон.

- интерактивность фильтрации (период, район, тип школы).

- минимизацию перегрузки интерфейса при сохранении информативности.

- поддержку управленческих сценариев («что происходит», «где проблема», «что делать»).

Особое внимание уделялось принципу когнитивной наглядности: цветовые шкалы, индикаторы риска, градиентные карты и ранжирование используются для быстрого восприятия состояния системы.

Рассмотрим структуру аналитической панели уровня образовательной организации. Школьная панель предназначена для оперативного контроля состояния материально-технической базы. Ключевым элементом является индикатор интегрального индекса обеспеченности с цветовой шкалой:

- критическая зона;

- допустимая зона;

- высокий уровень обеспеченности.

Такое представление позволяет быстро оценить общее состояние школы.

Анализ обеспеченности по категориям представлен таблично-графическим блоком, в котором отражаются: фактическое количество оборудования; нормативная потребность; дефицит; индекс по категории; вес категории в интегральной оценке. Данный блок обеспечивает прозрачность формирования итогового показателя.

Панель мониторинга состояния оборудования включает:

- статус оборудования (в рабочем состоянии / на грани / неисправно);

- риск устаревания по срокам эксплуатации;

- количество единиц, требующих замены в ближайший период.

Это позволяет переходить от оценки обеспеченности к управлению жизненным циклом ресурсов.

Аналитическая панель позволяет формировать управленческие рекомендации и на основе выявленных дефицитов формируются: перечень оборудования к закупке; приоритетные направления модернизации; объём необходимого пополнения.

Таким образом, аналитическая панель выполняет не только диагностическую, но и рекомендательную функцию. На основе предложенной математической модели была спроектирована аналитическая панель школы на основе реальных данных одной из школ г. Павлодара. Аналитическая панель представлена в соответствии с рисунком 3.



Рис.3 - Аналитическая панель школы

Аналитическая панель школы сочетает нормативную оценку обеспеченности с анализом фактического состояния оборудования, позволяя учитывать не только количество ресурсов, но и степень их износа и риск устаревания.

Кроме того, модель ориентирована на оперативное управление: она детализирует вклад каждой категории ресурсов в интегральный показатель и формирует конкретные рекомендации по устранению выявленного дефицита.

Региональная панель ориентирована на руководителя субъекта управления и предназначена для стратегического анализа. В верхней части панели размещаются агрегированные показатели: региональный интегральный индекс обеспеченности; доля критических школ; показатель неравномерности (например, коэффициент Джини); динамика изменения индекса за период.

Данный блок обеспечивает быструю оценку состояния образовательной инфраструктуры региона.

Блок аналитики распределения включает: распределение школ по значению индекса; долю организаций в критической зоне; диаграммы влияния риска на снижение индекса. Это позволяет определить масштаб проблемы и её структурные особенности.

Картографический модуль отражает: территориальное распределение индекса; районы с пониженной обеспеченностью; зоны концентрации дефицита.

Использование цветовой градации обеспечивает интуитивную интерпретацию региональных дисбалансов.

Отдельные блоки панели отображают:

- вклад категорий ресурсов в снижение индекса;

- вклад районов в формирование регионального риска;

- список проблемных школ с указанием ключевых дефицитов.

Это формирует аналитическую основу для приоритизации управленческих решений. Проект аналитической панели региона представлен на рисунке 4.

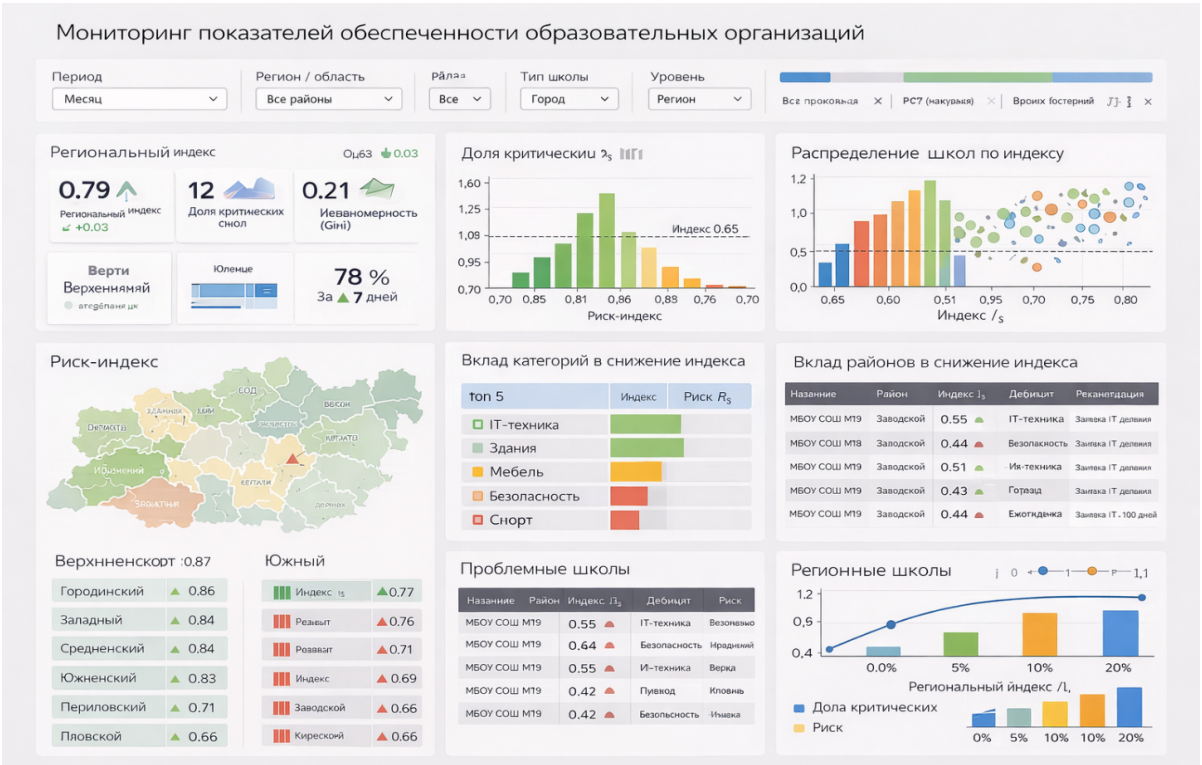


Рис.4 - Аналитическая панель региона

При проектировании использованы имитационные данные, отражающие типовую структуру обеспеченности образовательных организаций региона, что позволило провести верификацию аналитической панели на репрезентативной модели распределения показателей. В таблице 1 представлено сопоставление уровней визуализации аналитической панели школы и региона.

Таблица 1 - сопоставление уровней визуализации аналитической панели школы и региона

Характеристика	Уровень школы	Уровень региона
Тип анализа	Оперативный	Стратегический
Горизонт планирования	Краткосрочный	Среднесрочный
Детализация	По категориям оборудования	По районам и школам
Управленческая задача	Устранение дефицита	Приоритизация ресурсов
Основной пользователь	Директор школы	Региональный орган управления

Предложенные аналитические панели для школы и региона обеспечивают:

- переход от отчётности к управляемости;
- снижение информационной асимметрии;
- прозрачность распределения ресурсов;
- повышение обоснованности решений.

Иерархическая организация визуализации позволяет согласовать локальные управлен

ческие действия школ с региональной стратегией развития образовательной инфраструктуры.

Выводы. В работе представлена аналитическая панель информационно-аналитической системы мониторинга материальной обеспеченности образовательных организаций региона, отражающая анализ данных о состоянии материально-технической базы школ на основании предложенной математической модели.

В отличие от существующих решений, ориентированных преимущественно на отчётное представление данных, предложенный подход:

1. Формирует двухуровневую систему визуализации (школа - регион), обеспечивающую согласованность локального и стратегического анализа.

2. Реализует принцип управленческой ориентированности интерфейса, при котором визуализация структурирована в соответствии с задачами принятия решений (диагностика - анализ причин – формирование рекомендаций).

3. Интегрирует нормативно-ориентированную и риск-ориентированную оценку в едином визуальном пространстве без перегрузки пользователя математическими деталями.

4. Предлагает механизм визуального ранжирования образовательных организаций и территорий на основе интегральных показателей, обеспечивающий прозрачность распределения ресурсов.

5. Обеспечивает пространственную и структурную декомпозицию индекса обеспеченности через картографические и категориальные модули визуализации.

Таким образом, разработанная аналитическая панель представляет собой не просто средство отображения данных, а инструмент управляемого мониторинга, позволяющий повысить обоснованность решений в сфере развития образовательной инфраструктуры региона.

Литература

1. OECD. Education at a Glance 2023: OECD Indicators/ OECD Publishing, Paris. -2023. DOI 10.1787/e13bef63-en.

2. Realizing the Future of Learning: From Learning Poverty to Learning for Everyone, Everywhere/ World Bank. -2020. https://documents1.worldbank.org/curated/en/250981606928190510/pdf/Realizing-the-Future-of-Learning-From-Learning-Poverty-to-Learning-for-Everyone-Everywhere. - Date of address: 07.01.2026

3. Viberg O., Hatakka M., Bälter O., Mavroudi A. The current landscape of learning analytics in higher education // Computers in Human Behavior. -2020. -Vol.89. -P.98-110. DOI 10.1016/j.chb.2018.07.027.

4. Sarker I.H. Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions// SN Computer Science. -2021. -Vol.2:160. DOI 10.1007/s42979-021-00592-x.

5. Li D-P, Cheng S-J, Cheng P-F, Wang J-Q, Zhang H-Y (2018) A novel financial risk assessment model for companies based on heterogeneous information and aggregated historical data// PLoS ONE. -2018. -Vol.13(12): e0208166. DOI 10.1371/journal.pone.0208166.

6. Satria T. F., Hadiguna R. A., Henmaidi H., Arief I. Performance measurement in local government: A systematic review towards efficient public sector management// International Journal of Innovative Research and Scientific Studies. -2025. –Vol.8(4). -P.1417–1428. DOI 10.53894/ijirss.v8i4.8093.

7. Few S. Information Dashboard Design: The Effective Visual Communication of Data/O' Reilly. - 2006. ISBN 978-0-596-10016-2.

8. Shneiderman B., et al. Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction.6th ed./ Pearson Education Limited. -2018. -616p. ISBN 978-1-292-15391-9.

9. Bai H. Design and application of decision support systems for educational management based on big data // Journal of electrical system. -2024. -Vol.20(6s). -P.1645-1655. DOI 10.52783/jes.3084.

10. OECD. OECD Digital Education Outlook 2023: Towards an Effective Digital Education Ecosystem/ OECD Publishing, Paris. -2023. DOI 10.1787/c74f03de-en.

Сведения об авторах

Утюбаев Е.Ш. - руководитель КГУ «Павлодарский областной центр информационных технологий» управления образования Павлодарской области, Павлодар, Казахстан, e-mail: elnar87@mail.ru;

Шапорева А.В. - PhD, доцент, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан, e-mail: annvolkova@mail.ru;

Григоренко О.В.- канд. физ.-мат. наук., доцент, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия, e-mail: ogrigorenko2311@mail.ru;

Ельтинова Р.А. - магистр информатики, Павлодарский педагогический университет им. Әлкей Марғұлан, Павлодар, Казахстан, e-mail: yeltinova_raushan@ppu.edu.kz;

Джакипбаев А.К. - учитель информатики, УО Павлодарской области, ОО города Аксу СОШ им. Абая, Аксу, Павлодарская область, Казахстан, e-mail: djakipbaev_abay@mail.ru.

Information about authors

Utyubayev Ye. Sh. - Head of the Pavlodar Regional Center of Information Technologies, Pavlodar Region Department of Education, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: elnar87@mail.ru;

Shaporeva A.V.- PhD, Associate Professor of the Department of Construction and Design M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan, e-mail: annvolkova@mail.ru;

Grigorenko O.V. - Ph. D., Associate Professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia, e-mail: ogrigorenko2311@mail.ru;

Yeltinova R.A. - master of Informatics, Alkey Margulan Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: yeltinova_raushan@ppu.edu.kz;

Djakipbaev A. K.- computer science teacher, educational institution of Pavlodar region, educational institution of the city of Aksu, Abai secondary school, Aksu, Pavlodar oblast, Kazakhstan, e-mail: djakipbaev_abay@mail.ru.

ҒТАМР 61.53.91 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1248**

ПОЛИМЕР ҚАЛДЫҚТАРЫН ТЕРМОКАТАЛИТИКАЛЫҚ ӨҢДЕУ ПРОЦЕСІ ҮШІН ТАБИҒИ ЦЕОЛИТ НЕГІЗІНДЕГІ КАТАЛИЗАТОРЛАРДЫҢ БЕЛСЕНДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

[1]Е. Аубакиров, [1]Ж. Ташмухамбетова, [2]Ф. Ахметова✉, [2]С. Сатаева, [1]А. Кенесова, [3]А. Темирова

[1]әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,
[2]Жәңгірхан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан,
[3]ЖШС«Munai Eco Engineering», Алматы, Қазақстан

✉ *Корреспондент-автор: firuza.92@mail.ru.*

Катализатор ретінде Тайжүзген кен орны табиғи цеолитін молибден тұздарымен модификацияланған композитті материалдар пайдаланылды. Оңтайлы реакция жағдайлары 450°С температурада және 0,5-0,6 МПа қысымда анықталды. Сұйық фракцияларды талдау, құрамында 2,0% Мо бар катализатордың дистилляттың ең жоғары шығымын (61,55% дейін) қамтамасыз ететіні және алканды және ароматты көмірсутектердің түзілуіне ықпал ететіндігі анықталды, нәтижесінде алынған өнімді одан әрі мотор отыны мен химиялық шикізат өндірісінде пайдалану үшін перспективалы етеді.

Термокаталитикалық гидрлеу пластмасса және резеңке қалдықтарын қайта өңдеудің экологиялық таза және технологиялық тұрғыдан мүмкін әдісі ретінде өзінің тиімділігін дәлелдеді.

Түйін сөздер: табиғи цеолит, полимер қалдықтары, термокаталитикалық өңдеу, мазут, сканерлеуші микроскоп, көмірсутектер.

STUDY OF THE ACTIVITY OF NATURAL ZEOLITE-BASED CATALYSTS FOR THERMOCATALITIC TREATMENT OF POLYMER WASTES

[1]Y. Aubakirov, [1]Zh. Tashmukhambetova, [2]F. Akhmetova✉, [2]S. Satayeva, [1]A. Kenessova, [3]A. Temirova

[1]al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
[2]Zhangirkhan West-Kazakhstan agrarian technical university, Uralsk, Kazakhstan,
[3]LLP «Munai Eco Engineering», Almaty, Kazakhstan,
e-mail:firuza.92@mail.ru

This paper presents the results of a study of thermocatalytic hydrogenation for the conversion of polymer waste into valuable liquid hydrocarbon products. Composite materials modified with molybdenum salts of natural zeolite from the Taizhuzgen deposit were used as catalysts. Optimal reaction conditions were determined at a temperature of 450°C and a pressure of 0.5-0.6 MPa. Analysis of liquid fractions revealed that the catalyst containing 2.0% Mo provides the highest distillate yield (up to 61.55%) and promotes the formation of alkane and aromatic hydrocarbons, making the resulting product promising for further use in the production of motor fuels and chemical raw materials. Thermocatalytic hydrogenation has proven its effectiveness as an environmentally friendly and technologically advanced method for recycling plastic and rubber waste. Glass is one of the most important materials widely used in the construction industry and everyday life. The demand for Glass Products is growing every year, which, in turn, leads the glass industry to increase production volumes and maintain their quality. Scientific and technological advances in glass production have played a huge role in expanding the scope of its application. New production methods and approaches to improving the existing technological processes appeared, and new areas of application of glass began to open up. By changing the chemical composition of the product, various types of glass were created. In this regard, it is important to study the methods of obtaining glass with different properties. For the production of various products, a study of its physico-chemical properties was carried out, preparing a composition of colored glass in laboratory conditions. According to the results of the study, it was found that the resulting colored glass can be used in decorative purposes.

Keywords: natural zeolite, polymer waste, thermocatalytic treatment, fuel oil, scanning microscope, hydrocarbons.

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ЦЕОЛИТОВ ДЛЯ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

[1]Е. Аубакиров, [1]Ж. Ташмухамбетова, [2]Ф. Ахметова✉, [2]С. Сатаева, [1]А. Кенесова, [3]А. Темирова

[1]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
[2]Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангирхана, Уральск, Казахстан,
[3]ТОО «Munai Eco Engineering», г. Алматы, Казахстан,
e-mail: firuza.92@mail.ru

В данной работе представлены результаты исследования процесса термокаталитического гидрирования с целью переработки полимерных отходов в ценные жидкие углеводородные продукты. В качестве катализаторов были использованы композиционные материалы, модифицированные молибденовыми солями природного цеолита месторождения Тайжузген. Определены оптимальные условия реакции при температуре 450 °С и давлении 0,5-0,6 МПа. Анализ жидких фракций показал, что катализатор, содержащий 2,0% Mo, обеспечивает наибольший выход дистиллятов (до 61,55%) и способствует образованию алкановых и ароматических углеводородов, что делает получаемый продукт перспективным для дальнейшего использования в производстве моторных топлив и химического сырья. Термокаталитическое гидрирование доказало свою эффективность как экологически чистый и технологичный метод переработки отходов пластика и резины.

Ключевые слова: природный цеолит, полимерные отходы, термокаталитическая переработка, мазут, сканирующий микроскоп, углеводороды.

Кіріспе. Қазіргі заманның өзекті экологиялық проблемаларының бірі - шиналар, пластмассалар, резеңке бұйымдары сияқты көмірсутектерге бай қалдықтардың үздіксіз жиналуы. Бұл заттар табиғи ыдырау мен биодеградацияға өте төзімді, бұл олардың қоршаған ортада ұзақ уақыт сақталуына әкеледі. Демек, олар полигондарда және ашық жерлерде жиналып, елеулі экологиялық қауіптер тудырады. Бұл проблеманы шешу тұрақты даму үшін өте маңызды және қалдықтарды өңдеудің озық технологияларын жақсарту бойынша мәселелерді қамтиды. Мұндай әдістер қалдықтарды қазандық отындарын, көмірсутек мономерлерін, майлау материалдарын, шайырды және коксты қоса алғанда, негізгі өнеркәсіптік және тұтыну тауарларын өндіру үшін пайдаланылатын құнды қайталама шикізатқа айналдыруға мүмкіндік береді [1-5].

Осы саладағы зерттеулердің негізгі бағыты құрамында көміртегі бар қалдықтарды басқару және қайта өңдеудің тиімді жүйелерін құру болып табылады. Қазіргі уақытта шиналарды, резеңкелерді және пластикті қайта өңдеу әдістерінің көпшілігі энергияны қалпына келтіруге бағытталған төмен температуралық термиялық өңдеулерді немесе пиролизді пайдаланады. Дегенмен, бұл әдістердің бірнеше кемшіліктері бар, өйткені нәтижесінде пайда болатын жеңіл фракциялар мен қатты қалдықтар толық емес жану және нашар отын сапасымен байланысты мәселелерді жиі көрсетеді. Бұл кемшіліктерді жою үшін көмірсутектерді жоғары температурада термокаталитикалық немесе термодеструктивті бөлу тиімдірек және ұтымды балама ұсынады [6-10]. Бұл технологиялар сұйық көмірсутектер, жанармай компоненттері, кокстелетін материалдар және шайыр тәрізді қалдықтар сияқты химия өнеркәсібі үшін құнды шикізаттарды өндіруді жеңілдетеді [11-13].

Пластикалық қалдықтарды кәдеге жарату контекстінде бір сатылы термокаталитикалық түрлендіру жоғары сапалы мотор отындарын өндіруде ерекше тиімділікті көрсетеді [14]. Қалдықтарды өңдеудің әртүрлі әдістерінің ішінде термокаталитикалық ыдырау перспективалы әдістердің бірі ретінде ерекшеленеді, өйткені ол полимер қалдықтарын синтетикалық отынға әрі қарай өңдеуге жарамды көмірсутекті фракция-

ларға айналдыруға мүмкіндік береді [15-16].

Зерттеудің мақсаты шиналар мен пластикалық материалдарды қайта өңдеу үшін термокаталитикалық гидрлеу процестерін зерттеу және жақсарту болды. Тәжірибелер шикізат ретінде полимер қалдықтары мен мазутты, катализатор ретінде табиғи цеолит негізіндегі инновациялық композиттік катализаторларды қолдану арқылы жүргізілді.

Материалдар мен әдістер. Термокаталитикалық гидрлеу реакцияларында шикізат ретінде «Bericap Kazakhstan» ЖШС шығарған сусын бөтелкелерінің қақпақтарын өлшемдері 3-6 мм ұнтақтау арқылы дайындалған. Барлық химиялық реагенттер қосымша тазартусыз пайдаланылды және барлық ерітінділер дистилденген суда дайындалды.

Тайжүзген кен орнының табиғи цеолиті алдын ала ұнтақтаудан және өлшемі 0,25 мм молекулалық тор арқылы електен өткеннен кейін пайдаланылды. Цеолит 18 сағат бойы су моншасында үздіксіз араластыру кезінде 0,1 М NH_4Cl ерітіндісімен ион алмастыру әдісі арқылы өңдеуден өтті. Қышқылдық модификациядан кейін цеолит сүзгіден өткізіліп, хлорид иондары толығымен жойылғанша тазартылған сумен мұқият жуылды. Кейіннен NH_4 иондарын H иондарымен алмастыру үшін 100-500 °C-қа дейінгі температурада ауа ағынында 4-5 сағат бойы термиялық активтеу жүргізілді. Термоактивтеу кезінде ауа ағынының жылдамдығы 500 мл/мин деңгейінде сақталды.

Алынған катализатордың бір бөлігі сутегі иондарын молибден және вольфрам иондарымен ауыстыру үшін 80 °C температурада аммоний молибдаты мен аммоний вольфрам ерітінділерімен қосымша сіңдірілген және модификацияланған үлгілер 4 сағат бойы 100-600 °C температура диапазонында күйдіруге ұшырады.

Пластикалық қоспаны 0,5 МПа қысыммен, 450°C дейінгі температурада және 15 минут бойы үздіксіз араластырумен периодты режимде жұмыс істейтін қондырғыда жүргізілді. Қондырғы көлемі 150 мл болатын тот баспайтын болаттан реактордан тұрды. Реактор трансформатор және амперметрмен басқарылатын айнымалы ток қыздырғышы арқылы қыздырылды. Реактордағы температураны бақылау хромель-тамшы термопара арқылы жүзеге асырылды. Термокаталитикалық гидрлеу каталитикалық белсенділікті және селективтілікті бағалау үшін орындалды. Процесс блогындағы қысым азотты пайдаланып жасалды және манометрмен өлшенді. Полимердің (7 г), катализатордың (0,28 г) және паста түзетін агенттің (7 г) қоспасы реакторға салынды, содан кейін реактордың тығыздығы тексерілді, азотпен тазартылды, 0,5-0,6 МПа қысым орнатылды, содан кейін қыздыру құрылғысы қосылды.

Реактордың қыздыруы процесті бастағаннан кейін 30-40 минуттан кейін (қысым төмендеген кезде) өшірілді және жүйе бөлме температурасына дейін салқындатылды. Процесс барысында пайда болған газ қаныққан NaCl ерітіндісі бар газометрде жиналды. Түзілген газ мөлшері қысым айырмашылығынан есептелді.

Сұйық өнімді әртүрлі температуралық (0-180°C, 180-250°C, 250-320°C) фракцияларға бөлу арқылы айдау қондырғыда жүргізілді. Ол үшін бөлме температурасына дейін салқындатылатын реактордың форсункасына қабылдағышы бар конденсатор қосылды. Айдау кезінде реактор қыздырылып, әртүрлі температуралық фракциялар жиналды. Құрылғыны салқындағаннан кейін қалған қалдық реактордан алынды. Әрбір тәжірибе бірдей жағдайларда үш рет жүргізілді. Тәжірибе нәтижелері арасындағы ауытқу 2%-дан аспады.

Әрбір фракцияның құрамы электронды соққы ионизациясымен сканерлеу режимінде жұмыс істейтін Agilent 7890A/5975C (АҚШ) газ хроматографиясы-масс-спектрометрі арқылы талданды.

Нәтижелер және талқылау. Термокаталитикалық гидрлеу әдісімен полимерлі қалдықтарды өңдеу үшін тиімді катализаторды анықтау сұйық өнімдердің шығымдылығын талдау негізінде жүргізілді. «Тайжүзген» кен орнының цеолиті негізінде дайындалған және құрамында 0,5–2,0% молибден (Mo) бар катализаторлардың қатысуымен жүргізілген термокаталитика-

лық гидрлеу нәтижелері 1-кестеде келтірілген.

Жүргізілген тәжірибелер негізінде тиімді катализатор ретінде Тайжүзген кен орны цеолиті негізіндегі 2,0% Мо отырғызылған катализатор болып табылды. Таңдау полимер қалдықтарын термокаталитикалық гидрлеу кезінде алынған сұйық фракциялардың шығымы бойынша жүргізілді.

Термокаталитикалық гидрлеу арқылы алынған сұйық өнімдердің химиялық құрамы мен концентрациясын анықтау үшін газ хроматографиялық талдау жүргізілді. Масс-спектрометриялық әдісті қолдана отырып, қайнау температурасы 0-180 °С, 180-250 °С және 250-320 °С болатын фракциялардағы көмірсутектердің топтық құрамы анықталды.

1-кесте. 0,5 - 2,0 % Мо отырғызылған «Тайжүзген» кен орны цеолиті қатысында жүргізілген полимерлі қалдықтарды термокатализдік гидрогенизациялық өңдеу процестері

Бастапқы шикізат	Катализатор	m(0-180°С), %	m(180-250°С), %	m(250-320°С), %	Сұйық дистилляттардың шығымы, %
Полимер қалдықтары + мазут	0,5% Мо/цеолит	13,21	14,11	7,27	32,89
	1,0% Мо+ цеолит	17,52	8,79	6,58	34,59
	1,5% Мо+ цеолит	15,07	21,44	6,74	53,25
	2,0% Мо+ цеолит	12,44	19,12	30,0	61,55

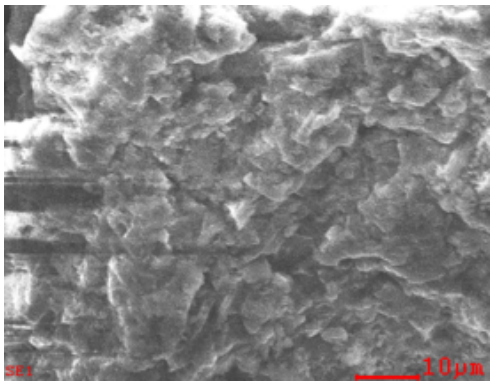
2-кесте. 2% Мо/цеолит қатысында полимер қалдықтарын термокаталитикалық өңдеуден алынған сұйық фракциялардың топтық көмірсутектік құрамы

Көмірсутектердің топтық құрамы	2,0 %-дық Мо/цеолит катализаторы қатысында көмірсутектердің шығымы, %		
	0-180°С	180-250°С	250-320°С
Алкан	33,18	37,45	54,91
Изоалкан	7,33	33,49	5,94
Алкен	6,07	4,45	3,28
Циклоалкан	22,01	12,73	6,63
Циклоалкен	5,35	1,43	0,42
Ароматты көмірсутектер	22,07	6,18	27,13

Бастапқы және модифицирленген цеолиттің сапалық және сандық құрамы рентгендік флуоресценциялық талдаудың көмегімен анықталды. Алынған нәтижелер энергиядисперсиялық спектроскопия көмегімен алынған нәтижелерге толығымен сәйкес келеді.

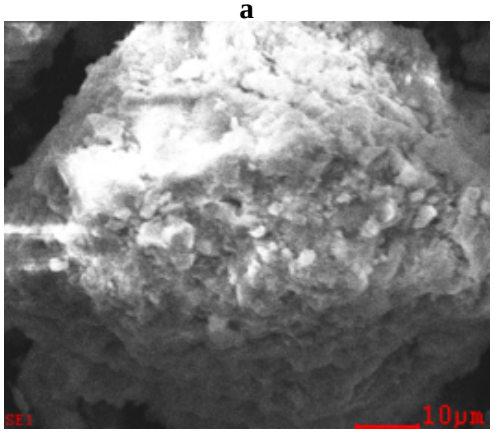
Бастапқы цеолитпен дайындалған үлгілердің морфологиясы және қышқылсыз әдіспен активтелген цеолит электронды микроскоптың 10000

есе үлкейту зерттелді. Көріп отырғанымыздай, активтелмеген және активтелген цеолиттің (1-сурет) бетінде айқын кеуектілігі бар ұсақ дисперсті, борпылдақ құрылымдар байқалады.



а

Элемент	wt.%	at.%
C	4,91	8,61
O	39,93	52,64
Na	1,51	1,39
Al	9,56	7,47
Si	30,98	23,26
K	10,42	5,62
Fe	2,69	1,02



ә

Элемент	wt.%	at.%
C	7,34	12,28
O	43,41	54,53
Mg	0,79	0,65
Al	8,67	6,46
Si	31,44	22,49
K	3,81	1,96
Fe	4,54	1,63

1-сурет. Активтелмеген (а) және активтелген (ә) цеолиттің микроэлектрондық фотосуреті

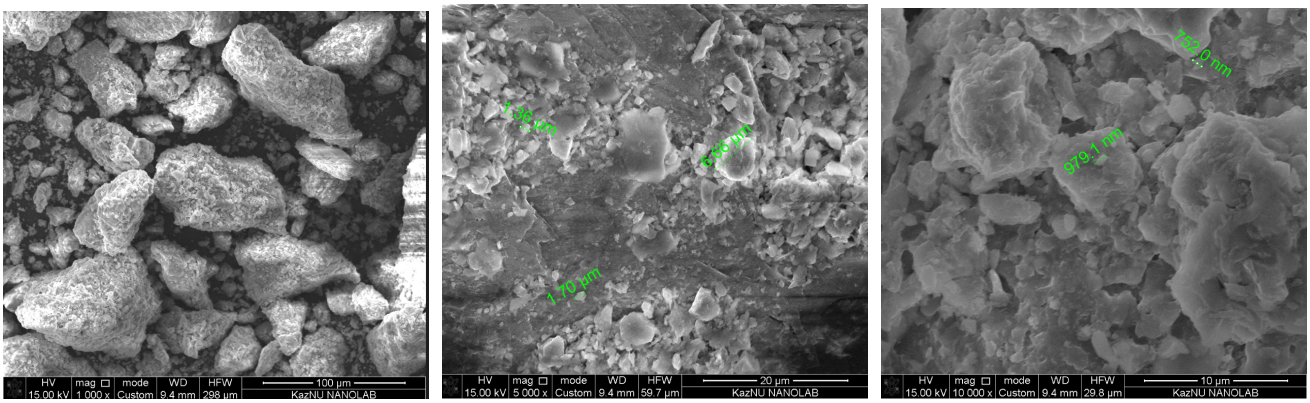
Бастапқы және активтелген цеолиттердің беткі морфологиясы 10000 есе үлкейту бойынша сканерлеуші электрондық микроскопия көмегімен зерттелді. Алынған микросуреттер активтелген цеолит құрылымында елеулі өзгерістерді анықтайды. Активтелмеген цеолит пішіні дұрыс емес агрегатталған бөлшектері бар салыстырмалы түрде тығыз, кеуекті құрылыммен сипатталады. Сонымен қатар, активтелген үлгі неғұрлым дамыған кеуектілікті және бетінде біркелкі таралған ұсақ дисперсті, борпылдақ бөлшектердің болуын көрсетеді.

Байқалған құрылымдық өзгерістер NH_4Cl ерітіндісімен өңдеу бойынша, сонымен қатар термоактивтеу кезінде кристалдық тордың ішінара реконструкциясына байланысты болуы мүмкін. Микрокеуекті және мезокеуекті құрылымның қалыптасуы катализатордың меншікті бетінің ұлғаюына ықпал етеді және оның термокаталитикалық гидрлеу реакцияларындағы белсенділігін арттырады. Осылайша, цеолиттің активтелуі беттің химиялық құрамын өзгертіп қана қоймайды, сонымен қатар оның морфологиялық сипаттамаларына айтарлықтай әсер етеді, активті металл орталықтарының дисперсиясы және каталитикалық процестердің тиімді ағыны үшін оңтайлы жағдайларды қамтамасыз етеді.

Полимер қалдықтарын термокаталитикалық өңдеу нәтижелері бойынша катализаторды тереңірек талдау үшін 2% Mo/цеолит катализаторы үшін құрылымдық-морфологиялық ерекшеліктері зерттелді.2-суретте 2% Mo/цеолит катализаторына 1000x,5000x,10000x ұлғайтылған микроскоптың

микроэлектрондық фотосуреттері көрсетілген.

Микроскоптың ажыратымдылығын 1000х, 5000х және 10000х дейін ұлғайта отырып, 2% Mo/цеолит негізіндегі катализатордың беттік морфологиясының біртектілігі анықталды, онда өлшемдері 1,36; 1,70 және 6,66 мкм-ден 752,0 және 979,1 нм-ге дейінгі бөлшектер бақыланады. Жалпы алғанда, катализатор түйіршікті құрылым болып табылады, бөлшек өлшемдерінің өте кең диапазоны бар. Активтелген цеолиттің беттік модификациясы кеуек жиектерін тегістейді және кеуектер мөлшерінің гетерогенділігін арттырады.



а) **ә)** **б)**

2-сурет.2% Mo/цеолит катализаторының микроэлектрондық фотосуреттері: а) х1000; ә) х5000; б) х10000

Осылайша, цеолиттің молибден тұзымен модификациясы катализатордың морфологиясына айтарлықтай әсер етуі мүмкін екендігі және осыған байланысты алынған катализаторлар көмірсутектерді гидрогенизациялау процесінде термокаталитикалық конверсиялау процесінде сұйық фракциялардың шығымы мен құрамына әр түрлі әсер етуі мүмкін екендігі анықталды.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеулер Тайжүзген кен орнының табиғи цеолиті негізінде дайындалған және молибден тұздарымен модификацияланған катализаторлар қатысында көмірсутектерге бай полимер қалдықтарын термокаталитикалық гидрлеу процесінің жоғары тиімділігін дәлелдеді. Процестің оңтайлы шарттары 450 °С температурада және 0,5-0,6 МПа қысымда анықталды.

Эксперименттік деректерге сәйкес, құрамында 2,0 мас.% Mo бар цеолит катализаторы сұйық дистилляттардың ең жоғары шығымын-61,55% қамтамасыз ететіні анықталды, бұл 0,5-1,5 мас.% Mo бар үлгілермен салыстырғанда 8-28% жоғары көрсеткішке ие. Алынған сұйық өнімдердің газ-хроматографиялық талдауы олардың құрамында алкандардың (33,18-54,91%) және ароматты көмірсутектердің (6,18-27,13%) басым екенін көрсетті, бұл өнімдерді мотор отындары мен химия өнеркәсібіне арналған шикізат ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Сканерлеуші электрондық микроскопия және элементтік талдау нәтижелері цеолиттің NH_4Cl ерітіндісімен өңделуі мен молибденмен модификациялануы нәтижесінде кеуектіліктің артуын, бөлшектердің дисперсиялануын және катализатор бетінің морфологиялық біртектілігінің жақсарғанын көрсетті. Бұл факторлар катализатордың белсенді орталықтарының санының артуына және термокаталитикалық гидрлеу реакцияларындағы селективтіліктің жоғарылауына ықпал етеді. Әзірленген технологияны пластикалық қалдықтарды кәдеге жарату және екінші көмірсутек шикізатын өндірудің экологиялық мәселесін шешудің перспективалық тәсілі ретінде

ұсынуға болады.

Қаржыландыру. *Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды. (Грант №BR28713351 «Құрамында көміртегі бар қалдықтарды энергия ресурстарына және сұранысқа ие өнімдерге кешенді өңдеу үшін жоғары тиімді каталитикалық технологияны әзірлеу»).*

Әдебиеттер

1. Thew C.X.E., Lee Z.S., Srinophakun P., Ooi C.W. Recent advances and challenges in sustainable management of plastic waste using biodegradation approach//Bioresource Technology.- 2023.-Vol.374:128772. DOI 10.1016/j.biortech.2023.128772.

2. Han D., Han W., Chen H. Pyrolysis of waste tires: A review//Polymers.-2023.-Vol.15(7):1604. DOI 10.3390/polym 15071604.

3. Osman Y.Yanchen, Sharif H.Zein. Latest advances in waste plastic pyrolytic catalysis //Processes. -2022.-Vol.10(4): 683. DOI 10.3390/pr10040683.

4. Afash H., Ozarisoy B., Altan H., Budayan C. Recycling of tire waste using pyrolysis: An environmental perspective//Sustainability.-2023.-Vol.15(19): 14178. DOI 10.3390/su151914178.

5. El-Wafai N.A., Farag M.I., Abdel-Basit H.M., et al. Eco-friendly degradation of natural rubber powder waste using some microorganisms with focus on antioxidant and antibacterial activities of biodegraded rubber//Processes.-2023.-Vol.11(8):2350. DOI 10.3390/pr11082350.

6. Pal S., Kumar A.et al. Recent advances in catalytic pyrolysis of municipal plastic waste for the production of Hydrocarbon fuels//Processes.-2022.-Vol.10(8):1497. DOI 10.3390/pr10081497.

7. Achilias D.S., Ciprioti S.C. et al. Thermal and catalytic recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment-Challenges and perspectives//Polymers.-2024.-Vol.16(17):2538. DOI 10.3390/polym16172538.

8. Biakhmetov B., et al. A review on catalytic pyrolysis of municipal plastic waste//WIREs Energy Environ.-2023.Vol.12(6):e495. DOI 10.1002/wene.495.

9. Nkiawete M.M., et al. Thermo-Catalytic Decomposition Comparisons: Carbon catalyst structure, hydrocarbon feed and regeneration//Catalysts.-2023.-Vol.13(10):1382. DOI 10.3390/catal13101382.

10. An L., Kou Z., Li R., Zhao Z. Research Progress in Fuel Oil Production by Catalytic Pyrolysis Technologies of Waste Plastics//Catalysts.-2024.-Vol.14(3).P.212. DOI 10.3390/catal14030212.

11. Seliverstov E.S., Furda L.V., Lebedeva O.E. Thermocatalytic Conversion of Plastics into Liquid Fuels over Clays//Polymers.-2022.-Vol.14(10):2115. DOI 10.3390/polym14102115.

12. Cai W., Kumar R., Zheng Y., Zhu Z. et al. Exploring the Potential of Clay Catalysts in Catalytic Pyrolysis of mixed plastic waste for fuel and energy recovery//Heliyon.-2023.-Vol.9(12):e23140. DOI 10.1016/j.heliyon.2023.e23140.

13. Syamsiro M., Cheng S., Hu W., Saptoadi H. et al. Liquid and Gaseous Fuel from Waste Plastics by Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Processes over Indonesian Natural Zeolite Catalysts//Waste Technology.-2014.-Vol.2.(2)- P.44-51. DOI 10.14710/2.2.44-51.

14. Wei J., Liu J., Zeng W., Dong Z., et al. Catalytic hydroconversion processes for upcycling plastic waste to fuels and chemicals//Catalysis Science & Technology.-2023.-Vol.13(5).-P.1258-1280. DOI 10.1039/D2CY01886A.

15. Vural U.S., Yinanc A., SevindirH.C. Two-stage thermocatalytic conversion of waste XLPE to diesel-like fuel//Serbian Chemical Society. -2024.-Vol.89(6). -P.921-937. DOI 10.2298/JSC230828035V.

16. Qian K., Tian W., Li W., Wu S., Chen D., Feng Y. Catalytic Pyrolysis of Waste Plastics over Industrial Organic Solid-Waste-Derived Activated Carbon: Impacts of Activation Agents// Processes.-2022.-Vol.10.(12):2668. DOI 10.3390/pr10122668.

Авторлар туралы мәлімет

Аубакиров Е.А. - химия ғылымдарының докторы, профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: miral.64@mail.ru;

Ташмухамбетова Ж.Х. - химия ғылымдарының кандидаты, доцент, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: zheneta@mail.ru;

Ахметова Ф.Ж. - PhD, аға оқытушы, Жәңгірхан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан, e-mail: firuza.92@mail.ru;

Сатаева С.С.- химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Жәңгірхан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан, e-mail: sataeva_safura@mail.ru;

Кенесова А. - оқытушы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: kenessova.aruzhan@gmail.com;

Темирова А. - PhD, «Munai Eco Engineering» ЖШС директоры, Алматы, Қазақстан, e-mail: aika179@mail.ru.

Information about the authors

Aubakirov Ye.- doctor of Chemical Sciences,professor, al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan, e-mail: miral.64@mail.ru;

Tashmukhambetova Zh.- candidate of Chemical Sciences, assoc. professor, al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan, e-mail:zheneta@mail.ru;

Akhmetova F.- PhD, senior lecturer, Zhangirkhan West-Kazakhstan agrarian technical university, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: firuza.92@mail.ru;

Satayeva S.S.- candidate of Chemical Sciences, ass.professor, Zhangirkhan West-Kazakhstan agrarian technical university, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: sataeva_safura@mail.ru;

Kenessova A. - lecturer, al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan, e-mail: kenessova.aruzhan@gmail.com;

Temirova A. - PhD, Director of LLP «Munai Eco Engineering», Almaty, Kazakhstan, e-mail: aika179@mail.ru.

МРНТИ 61.13.21, 50.43.15 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1389**

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РУДЕ В УСЛОВИЯХ ФАБРИКИ

[1]К. Акишев✉, [2]А. Подвалов, [1]А. Зейнуллин, [1]Е. Айбульдинов✉, [2]А. Нурмаганбетов, [2]М. Чагай, [1]М. Оспанова, [2]М. Айтиева, [1]Л. Мылтыкбаева

[1]Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан,
[2]ТОО AG Tech, Астана, Казахстан

✉ *Корреспонденты-авторы: akmail04cx@mail.ru, elaman_@mail.ru*

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оперативного и достоверного определения химического состава руды в условиях обогатительных фабрик для повышения эффективности рудоподготовки и снижения энергетических затрат. Целью исследования является разработка и валидация метода автоматизированного онлайн-анализа содержания меди в кусковой руде с использованием рентгенорадиометрической технологии. В качестве основного аналитического признака использован параметр спектральных отношений $H=N_{Cu}/N_S$, обеспечивающий компенсацию матричных и геометрических эффектов при поточном измерении.

Методы исследования включали лабораторные и динамические испытания рентгенорадиометрической сепарации, виртуальную и экспериментальную сортировку кусковой руды, а также сопоставление аналитических параметров с результатами химического анализа. Установлена устойчивая линейная корреляция между параметром H и содержанием меди, что подтверждает количественную применимость метода. Определён оптимальный диапазон порога отсечки $H \approx 0{,}14–0{,}15$, при котором формируется промпродукт с содержанием Cu 3,0–5,0 % при выходе 2–12 % и удалении до 88–98 % массы в виде бедных хвостов.

Научная новизна работы заключается в экспериментальном подтверждении применимости метода спектральных отношений для онлайн-анализа кусковой руды в фабричном потоке и интеграции аналитического признака в архитектуру программно-аппаратного комплекса.

Практическая значимость заключается в возможности использования полученных данных для мониторинга качества рудного потока и оптимизации режимов предварительного обогащения.

Дальнейшие исследования направлены на расширение спектра определяемых элементов, опытно-промышленную апробацию и интеграцию аналитических данных в цифровые модели процессов обогащения.

Ключевые слова: рентгенорадиометрический анализ, элементный состав, спектральные отношения, предварительное обогащение, кусковая руда, программно-аппаратный комплекс.

БАЙЫТУ ФАБРИКАСЫНДА ФЛОТАЦИЯ ПРОЦЕСІН БАСҚАРУДЫҢ БАҒДАРЛАМАЛЫҚ-АППАРАТТЫҚ КЕШЕНІН ӘЗІРЛЕУ

[1]К. Акишев✉, [2]А. Подвалов, [1]А. Зейнуллин, [1]Е. Айбульдинов✉, [2]А. Нұрмағанбетов, [2]М. Чагай, [1]М. Оспанова, [2]М. Айтиева, [1]Л. Мылтықбаева

[1]Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
[2]ЖКС AG Tech, Астана, Қазақстан,
e-mail: akmail04cx@mail.ru, elaman_@mail.ru

Зерттеудің өзектілігі Кен дайындау тиімділігін арттыру және энергия шығындарын азайту үшін байыту фабрикалары жағдайында кеннің химиялық құрамын жедел және сенімді анықтау қажеттілігіне байланысты. Жұмыстың мақсаты рентген-радиометриялық технологияны қолдана отырып, кесек Кендегі мыс құрамын автоматтандырылған онлайн-талдау әдісін әзірлеу және валидациялау болып табылады. Негізгі аналитикалық белгі ретінде h=NCU/NS спектрлік қатынас параметрі

қолданылады, ол ағындық өлшеу кезінде матрицалық және геометриялық эффектілердің өтемақысын қамтамасыз етеді.

Зерттеу әдістеріне зертханалық және динамикалық рентгендік радиометриялық сепарация сынақтары, кесек кенді виртуалды және эксперименттік сұрыптау және аналитикалық параметрлерді химиялық талдау нәтижелерімен салыстыру кірді. Н параметрі мен мыс құрамы арасында тұрақты сызықтық корреляция орнатылды, бұл әдістің сандық қолданылуын растайды. Н ≈ 0,14-0,15 кесу шегінің оңтайлы диапазоны анықталды, онда 2-12% шығу және кедей құйрықтар түрінде массаның 88-98% дейін алып тастау кезінде cu 3,0–5,0% өндірістік өнім қалыптасады.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы зауыттық ағындағы кесек кенді онлайн талдау үшін спектрлік қатынас әдісінің қолданылуын эксперименттік растау және аналитикалық белгіні бағдарламалық-аппараттық кешен архитектурасына біріктіру болып табылады.

Практикалық маңыздылығы-алынған деректерді кен ағынының сапасын бақылау және алдын-ала байыту режимдерін оңтайландыру үшін пайдалану мүмкіндігі.

Әрі қарайғы зерттеулер анықталатын элементтердің спектрін кеңейтуге, тәжірибелік-өнеркәсіптік сынақтан өткізуге және аналитикалық деректерді байыту процестерінің цифрлық модельдеріне біріктіруге бағытталған.

Түйін сөздер: рентгендік радиометриялық талдау, элементтік құрам, спектрлік қатынастар, алдын ала байыту, кесек кен, бағдарламалық-аппараттық кешен.

AUTOMATED DETERMINATION OF THE CONTENT OF CHEMICAL ELEMENTS IN ORE IN FACTORY CONDITIONS

[1]K. Akishev✉, [2]A. Podvalov, [1]A. Zeynullin, [1]Y. Aibuldinov✉, [2]A. Nurmaganbetov, [2]M. Chagay, [1]M. Ospanova, [2]M. Aitiyeva, [1]L. Myltykbayeva

[1]Kazakh University of Technology and Business named after K.Kulazhanov, Astana, Kazakhstan,
[2]AG Tech LLP, Astana, Kazakhstan,
e-mail: akmail04cx@mail.ru, elaman_@mail.ru

The relevance of the study is due to the need for prompt and reliable determination of the chemical composition of ore in processing plants in order to increase the efficiency of ore preparation and reduce energy costs. The aim of the study is to develop and validate a method for automated online analysis of the copper content in lump ore using X-ray radiometric technology. The spectral ratio parameter H=NCu/NS is used as the main analytical feature, which provides compensation for matrix and geometric effects during in-line measurement.

The research methods included laboratory and dynamic tests of X-ray radiometric separation, virtual and experimental sorting of lump ore, as well as comparison of analytical parameters with the results of chemical analysis. A stable linear correlation has been established between the H parameter and the copper content, which confirms the quantitative applicability of the method. The optimal range of the cut–off threshold H ≈ 0.14–0.15 has been determined, at which an industrial product with a Cu content of 3.0-5.0% is formed at a yield of 2-12% and removal of up to 88-98% of the mass in the form of poor tailings.

The scientific novelty of the work lies in the experimental confirmation of the applicability of the spectral relations method for online analysis of lump ore in a factory stream and the integration of the analytical feature into the architecture of the software and hardware complex.

The practical significance lies in the possibility of using the data obtained to monitor the quality of the ore flow and optimize the pre-processing modes.

Further research is aimed at expanding the range of identified elements, pilot testing and integration of analytical data into digital models of enrichment processes.

Keywords: X-ray radiometric analysis, elemental composition, spectral ratios, pre-enrichment, lump ore, hardware and software complex

Введение. Эффективность процессов дробления, сортировки и флотационного обогащения на горно-обогатительных предприятиях определяется точностью и оперативностью информации о химическом, фазовом составе перерабатываемого сырья.

В условиях изменения минералогического и гранулометрического состава руд традиционные методы лабораторного химического анализа не всегда, обеспечивают требуемой оперативности для принятия управленческих решений в режиме реального времени.

Продолжительность времени между отбором проб и получением результатов анализа приводят к запаздывающей коррекции технологических режимов, перерасходу реагентов, снижению извлечения полезных компонентов, росту энергозатрат.

В настоящее время существующие системы аналитического контроля на обогатительных фабриках, как правило ориентированы на периодический лабораторный анализ без интеграции в контуры АСУ-ТП. Современные тренды отмечают перспективность применения онлайн-аналитических методов, в частности рентгенофлуоресцентную (XRF), рентгенодифракционную (XRD) и лазерно-индуцированную спектроскопию (LIBS), используемых в составе программно-аппаратных комплексов, интегрированных в АСУ ТП предприятия

На практике реализация таких систем сталкивается с рядом технических и иных ограничений (влияние матричных эффектов, влажности, пылевыделения, нестабильность гранулометрического состава потока руды и т. д).

Существует проблема пространственно-временной неоднородности состава руды в потоке-это требует перехода от точечных измерений к непрерывному мониторингу, интеллектуальной обработке больших массивов спектральных, технологических и дополнительных данных.

Существующие подходы обработки XRF-спектров, на классических моделях фундаментальных параметров, снижают точность при изменении матрицы, толщины слоя материала, ограничивая применение в промышленных потоках.

В этой связи актуальной является разработка программно-аппаратного комплекса, позволяющего автоматизировать определение содержания химических элементов и оксидов в руде непосредственно в условиях фабрики, с возможностью интеграции в АСУ-ТП.

Для решения данной задачи предполагается использование мультисенсорных аналитических модулей, интеллектуальных методов обработки спектральных данных, механизмов адаптивной калибровки-это позволит повысить точность онлайн-анализа, обеспечить оперативную коррекцию технологических режимов.

Разработка, а также внедрение автоматизированных систем аналитического контроля химического состава руды, повышает устойчивость технологических процессов, снижает потери металлов в горно-металлургическом комплексе Республики Казахстан.

Целью настоящего исследования является разработка и обоснование программно-аппаратного комплекса для автоматизированного определения содержания химических элементов и оксидов в рудном сырье в условиях обогатительной фабрики с возможностью последующей интеграции в систему АСУ-ТП и использования результатов анализа для оперативной корректировки режимов переработки.

Экспресс-определение содержания элементов в потоке руды на фабрике является ключевым условием перехода от «запаздывающего» лабораторного контроля к оперативному управлению сортировкой, шихтованием и флотацией.

Практика предприятий показывает, что именно online XRF/EDXRF и родственные радиометрические подходы обеспечивают точность и ско-

рость, но требуют определенной методики калибровки, защиты оборудования, компенсации матричных эффектов и интеграции в АСУ- ТП.

В статье [1] показан промышленный кейс: мониторинг руды на конвейерах Балхашского и Карагайлинского концентраторов и главном конвейере Нурказган, измерения спектров выполнялись с секундной дискретностью, а расчет содержания по меди/цинку/свинцу/железу - по агрегированию нескольких измерений. Это важно, потому что фиксирует ключевое требование фабрики: стабилизация оценки за счет временного усреднения в потоке при высокой неоднородности материала.

В работе [2] описана методическая сторона внедрения online XRF-скрининга по Ag и сопутствующим элементам и подчеркиваются ограничения: низкие концентрации, требования к метрологии и сложности матрицы. Это напрямую переносимо на вашу задачу определения элементов в руде «в условиях фабрики», где матричные эффекты и гранулометрия критичны.

Даже при хорошей сенсорике основная проблема - переносимость калибровки между участками рудопотока и сменой матриц- исследования в этой области, а именно подготовке реперных образцов и методам пробоподготовки для неразрушающего РФА-анализа, показаны в работе [3] в том числе, выбор условий гомогенизации, прессования, подбор эталонных образцов, сопоставление разрушающих/неразрушающих методов).

Работы [4,5] показывает, что каждое внедрение online XRF требует предварительных лабораторных исследований, разработки методики и калибровки по стандартам, а промышленная пригодность определяется надежностью работы «месяцами без вмешательства». Это фактически формирует требования к вашему ПАК: пылевлагозащита, стабильность геометрии, контроль дрейфа.

Исследования посвященные XRF-данным содержащим информацию по множеству элементов, для ML-подходов представлены в работе [6], описана зависимость- классификация/оценка по XRF-сенсорным данным. В работе [7] XRF-сортировки медных руд использует ML-подходы (оптимизированные SVM/PSO-SVM)-это позволяет преодолевать ограничения линейных регрессий для сложных руд.

К примеру, в работе [8] фиксируется проблема не часто показанных измерений и в тоже время возможность интеллектуального восстановления/прогноза качества между измерениями.

Работа [9] показывает использование LIBS в минералогии/переработке, но это требует сложной калибровки и устойчивости к флуктуациям сигнала. Гибридная система (XRF + LIBS) улучшает устойчивость и учет всех параметров, но измерения усложняются.

В работах [10,11] показано, что состав руды является входным параметром для шихтования, реагентного режима, стабилизации показателей при этом к ключевым трудностям относятся - надежные измерения и переменность входов, в тоже время модели управления должны учитывать динамику и возмущения.

Анализ зарубежных и казахстанских исследований показывает, что online определение химического состава руды с использованием рентгенофлуоресцентных и рентгенорадиометрических методов является технически реализуемым и уже применяется на отдельных объектах горно-металлургического комплекса Республики Казахстан, включая конвейерные линии предприятий корпорации «Казахмыс» и месторождение Нурказган.

Эти подходы показали эффективность для оперативного мониторинга и предварительной сортировки, но в большинстве случаев используются как изолированные измерительные системы, слабо интегрированные в контуры управления технологическими процессами.

Ограничениями существующих подходов являются:

- высокая чувствительность к матричным эффектам;

- изменения гранулометрического состава;

- влажность;

- необходимость регулярной перекалибровки при изменении геологических и иных условий.

Это обуславливает потребность в применении интеллектуальных методов обработки спектральных данных и адаптивных моделей, для учета нелинейных зависимостей и динамики рудопотока.

В этой связи дальнейшие исследования целесообразно направить на развитие программно-аппаратных комплексов, объединяющих мультисенсорные аналитические модули, интеллектуальную обработку данных, адаптивную калибровку и интеграцию с SCADA и системами оптимального управления.

Для реализации цели в работе были поставлены следующие основные задачи:

- анализ существующих методов онлайн-аналитического контроля химического состава руды, включая рентгенофлуоресцентную (XRF), рентгенодифракционную (XRD) и рентгенорадиометрическую сепарацию (РРС), с точки зрения применимости в потоке и интеграции в контуры АСУ ТП;

- экспериментальное определение химического состава руды рентгенорадио-метрическим методом;

- формирование аналитического признака, устойчивого к матричным эффектам;

- виртуальная и динамическая сортировка кусковой руды;

- оценка эффективности предварительного обогащения;

- лабораторная валидация аналитических параметров;

- проектные решения по ПАК (концепция).

Решение указанных задач направлено на создание технологической основы для внедрения интеллектуальных систем аналитического контроля, обеспечивающих повышение эффективности обогащения, снижение потерь металлов и внедрение цифровых технологий в горно-металлургическом комплексе Республики Казахстан.

Методы и материалы. ***Объект и условия проведения исследований.*** Объектом

исследования являлись рудные материалы медно-порфирового месторождения Нурказган.

Экспериментальные работы проводились в рамках опытно-технологических испытаний с применением рентгенорадиометрической сепарации (РРС) и лабораторного рентгенофлуоресцентного анализа, направленных на оценку возможности предварительного обогащения руды и автоматизированного определения содержания химических элементов.

Исследования выполнялись в лабораторных и пилотных условиях с использованием дискретных образцов руды и модельных установок сортировки, без реализации непрерывного промышленного потока на конвейерных линиях.

В качестве исходного материала использовались технологические пробы руды месторождения Нурказган. Для экспериментальной сортировки было отобрано порядка 160 кусков рудного материала машинных классов, включая фракции порядка −80+50 мм, что соответствует типовым размерам кусковой руды перед стадией дробления и измельчения.

Для каждой пробы регистрировались:

- интенсивности характеристических рентгеновских линий меди и железа;

- интенсивность рассеянного первичного излучения (параметр Ns);

- интегральные спектры для последующего расчета аналитических признаков.

Лабораторные данные использовались также для сопоставления с результатами сортировки и оценки достоверности аналитических параметров.

Метод рентгенорадиометрического анализа и формирования разделительного признака.

В основе измерений использовался метод регистрации характеристического рентгеновского излучения элементов при облучении руды рентгеновским источником. Для повышения устойчивости аналитических оценок к изменению формы, крупности и матричных эффектов применялась нормализация интенсивности аналити-

ческих линий на сигнал рассеянного излучения образца Ns.

В качестве основного разделительного признака использовался параметр (ф-ла 1):

$$H = \frac{I_{Cu}}{Ns} \quad (1)$$

где I_{Cu} - интенсивность аналитической линии меди, Ns - интенсивность рассеянного излучения.

Такой подход позволяет частично компенсировать влияние толщины слоя, плотности и формы кусков руды, а также вариации матричного состава, что критично для задач сортировки и предварительного обогащения.

Процедура экспериментальной сортировки. Эксперименты выполнялись в два этапа:

Виртуальная сортировка - на основе зарегистрированных спектров проводился расчет аналитического признака H и моделирование разделения материала при различных пороговых значениях признака. Это позволяло определить предварительный диапазон оптимальных порогов разделения.

Динамическая сортировка - осуществлялась сортировка руды в движущемся режиме с регистрацией кумулятивных спектров и параметров для каждого куска, после чего материал разделялся на «обогащенный» и «обедненный» продукты.

Для каждого варианта порога разделения рассчитывались показатели:

- выход продуктов;

- содержание меди;

- коэффициент обогащения;

- контрастность разделения;

- эффективность процесса предварительного обогащения.

Статистическая обработка и оценка эффективности. Для анализа эффективности сортировки использовались зависимости:

- эффективности обогащения от порогового значения признака H;

- контрастности продуктов от среднего содержания меди;

- распределения аналитического признака по классам материала.

Показатели эффективности анализировались в сравнении с исходным содержанием меди в руде, что позволяло оценить целесообразность предварительного выделения бедных фракций до стадии флотации.

Оценка выполнялась на усредненных значениях по сериям испытаний, что снижает влияние случайных флуктуаций сигналов и обеспечивает статистическую устойчивость выводов.

Использование результатов в концепции программно-аппаратного комплекса.

Полученные экспериментальные данные рассматривались как основа для формирования требований к программно-аппаратному комплексу автоматизированного определения химического состава руды. В рамках ПАК предполагается использование:

- сенсорных модулей рентгенофлуоресцентного и рентгенорадиометрического анализа;

- подсистемы сбора и обработки спектральных данных;

- модулей вычисления аналитических признаков и формирования управляющих сигналов для систем сортировки и подготовки сырья.

Результаты и обсуждение. В ходе лабораторно-пилотных испытаний руды месторождения Нурказган для каждого куска материала регистрировались спектры характеристического рентгеновского излучения с выделением аналитических линий меди и железа, а также интенсивности рассеянного первичного излучения. Абсолютные значения интенсивностей аналитических линий демонстрировали значительный разброс, обусловленный вариациями формы, размеров и плотности кусков руды, а также неоднородностью минеральной матрицы. Для повышения устойчивости оценки содержания меди использовалась нормализация интенсивности аналитической линии меди на интенсивность рассеянного излучения, в результате чего был сформирован аналитический признак рис.1.

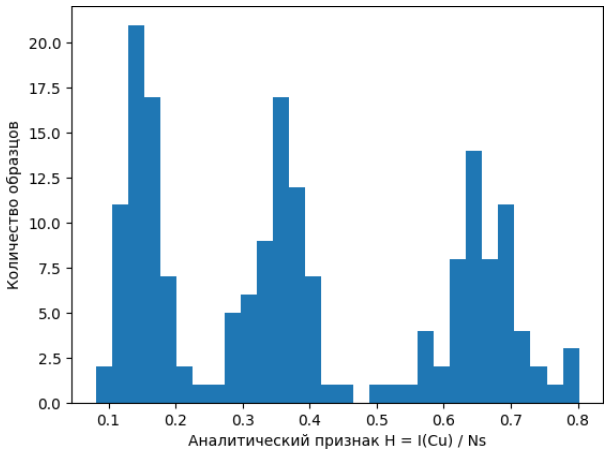


Рис.1 - Распределение аналитического признака H по серии образцов руды

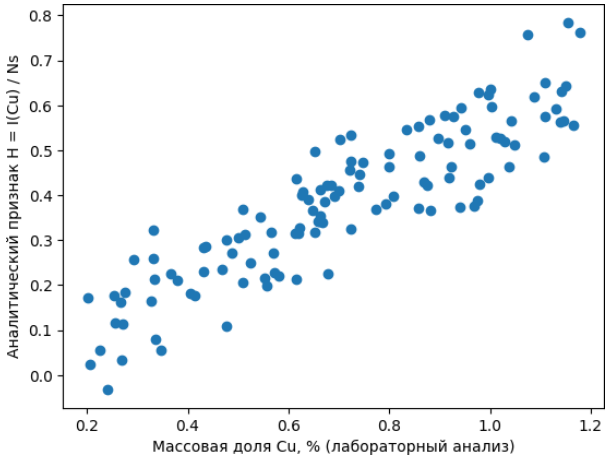


Рис.2 - Зависимость аналитического признака H от массовой доли Cu

Сопоставление аналитического признака H с результатами лабораторного химического анализа показало устойчивую положительную корреляцию, что подтверждает возможность использования рентгенорадиометрических параметров для предварительной количественной оценки содержания меди. При этом наилучшая воспроизводимость наблюдалась при использовании усреднённых значений, полученных по кумулятивным спектрам, что снижает влияние случайных флуктуаций сигнала.

График рис.2 иллюстрирует линейную тенденцию и разброс измерений, обусловленный неоднородностью руды.

Из рис.2 видно, что наблюдается устойчивая положительная корреляция между нормализованным спектральным признаком и содержанием меди, что подтверждает возможность использования рентгенорадиометрических параметров для предварительной количественной оценки качества руды. Разброс точек обусловлен неоднородностью минеральной матрицы, геометрическими факторами характерными для измерений кусковой руды.

Полученные экспериментальные данные показали, что метод обеспечивает уверенное различение фракций с пониженным и повышенным содержанием меди, что является достаточным для задач предварительного обогащения и отсечки бедных кусков до стадии измельчения, и флотации. Абсолютная точность определения концентрации ниже, чем у лабораторных методов, однако воспроизводимость, чувствительность признака *H* позволяют использовать его в качестве технологического индикатора качества руды.

График рис.2 демонстрирует наличие оптимального диапазона порогов разделения, при котором достигается максимальная эффективность предварительного обогащения. Смещение порога в сторону меньших значений, приводит к увеличению выхода пустой породы, а завышение порога сопровождается потерями полезного компонента.

Полученные экспериментальные данные показали, что метод обеспечивает различение фракций с пониженным и повышенным содержанием меди - это является достаточным для задач предварительного обогащения и отсечки бедных кусков до стадии измельчения и флотации. Абсолютная точность определения концентрации ниже, чем у лабораторных методов, но воспроизводимость, чувствительность признака *H* позволяют использовать его в качестве технологического индикатора качества руды.

На рис.3 представлена зависимость эффективности предварительной сортировки руды от порогового значения аналитического признака *H*, используемого для разделения материала на обогащённый и обеднённый продукты. Кривая носит выраженно нелинейный характер и имеет максимум в области средних значений порога,

что указывает на существование оптимального диапазона разделительных параметров.

При низких значениях порога *H* в обогащённый продукт попадает значительная доля бедных по меди кусков, что приводит к снижению контрастности разделения и уменьшению технологической эффективности. В этом режиме достигается высокий выход концентратного продукта, однако его среднее содержание меди остается близким к исходному, что снижает целесообразность предварительного обогащения. При увеличении порога *H* наблюдается рост содержания меди в обогащённом продукте, одновременно уменьшается его выход. При чрезмерно высоких порогах, возрастает доля потерь полезного компонента с отходами, что приводит к снижению общей эффективности процесса.

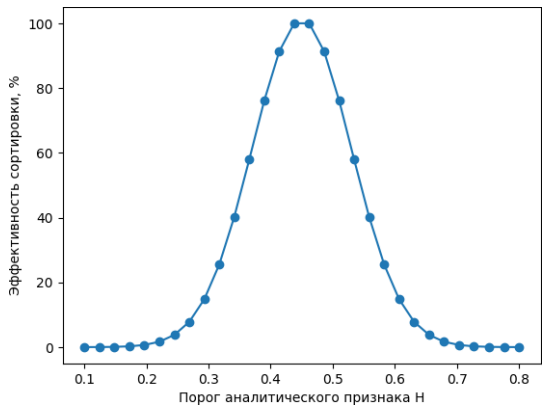


Рис.3 - Зависимость эффективности сортировки от порога аналитического признака H

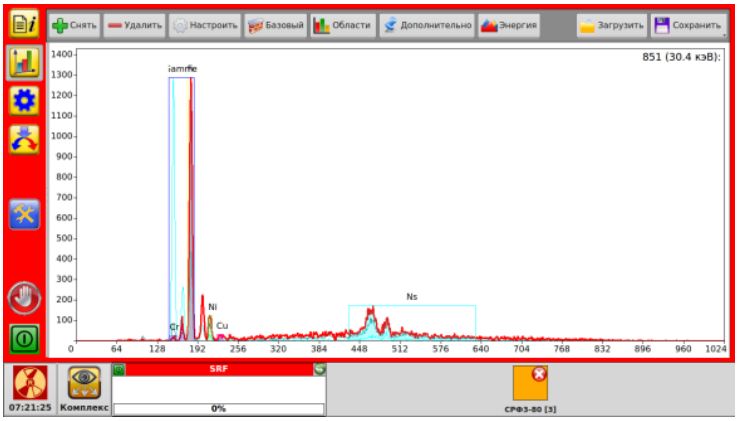


Рис.4 - Аппаратурный спектр руды с выделением аналитической линии Cu и зоны рассеянного излучения *Ns*

Высокая эффективность соответствует режиму, при котором достигается оптимальное соотношение между извлечением меди и отсечкой пустой породы. Полученная зависимость подтверждает необходимость адаптивного выбора порогов сортировки в зависимости от текущих свойств руды, а также производственных требований. Результаты демонстрируют, что управление порогом аналитического признака является эффективным инструментом оптимизации предварительного обогащения и может использоваться в составе программно-аппаратного комплекса, как регулируемый параметр технологического режима.

На рис.4 представлен аппаратурный спектр руды месторождения Нурказган, зарегистрированный в процессе рентгенорадиометрического анализа кускового материала. В спектре отчетливо выделяются характеристические пики меди, а также широкая область рассеянного излучения, формируемая в результате взаимодействия первичного рентгеновского пучка с минеральной матрицей образца.

Анализ спектров показал, что абсолютная интенсивность аналитической линии меди существенно зависит не только от концентрации элемента, но и от геометрии куска, толщины слоя, плотности материала и минерального состава. Эти факторы вызывают матричные эффекты и приводят к значительному разбросу аналитических параметров, что делает использование ненормализованных интенсивностей недостаточно устойчивым для задач сортировки и оперативного контроля качества. Для компенсации указанных эффектов была использована нормализация интенсивности аналитической линии меди на интенсивность рассеянного излучения, определяемого в спектре в отдельном энергетическом диапазоне (зона *Ns* на рис.4).

Применение данного признака позволило существенно снизить влияние вариаций геомет-

рии кусков и неоднородности минеральной матрицы, параметр Ns отражает суммарную интенсивность рассеяния, коррелирует с массой и плотностью материала в зоне облучения. Отношение I_{Cu}/N_s является более устойчивым к изменению условий измерений по сравнению с использованием абсолютных интенсивностей.

Экспериментальные распределения значений признака *H* показали формирование устойчивых групп, по различным уровням содержания меди, что обеспечивает его информативность и пригодность для порогового разделения материала при предварительном обогащении. Использование данного признака обеспечило повышение контрастности разделения, позволило сформировать стабильные пороговые значения для сортировки в различных сериях испытаний.

Устойчивость аналитического признака *H* подтверждена для условий кусковой руды в лабораторно-пилотных экспериментах. Влияние факторов промышленной среды, таких как высокая влажность, запылённость, работа в потоках пульпы, определяет необходимость дальнейшей опытно-промышленной валидации метода.

Таким образом, формирование нормализованного аналитического признака на основе отношения интенсивности аналитической линии меди к интенсивности рассеянного излучения является эффективным способом компенсации матричных эффектов и обеспечивает технологически устойчивый параметр для использования в составе программно-аппаратного комплекса автоматизированного контроля качества руды.

В рамках выполненных исследований реализован подход виртуальной сортировки кусковой руды, при котором решение о принадлежности каждого куска к обогащённому или отвальному продукту принимается на основе аналитического признака, сформированного по результатам рентгенорадиометрического измерения, без фактического механического разделения материала. Он позволяет оценить потенциальную эффективность сортировки, оптимизировать пороговые значения признака и спрогнозировать технологические показатели процесса без проведения дорогостоящих промышленных испытаний.

На рис.5 представлена схема экспериментальной установки и геометрия измерений, в которой каждый кусок руды последовательно проходит зону облучения и регистрации спектра. После вычисления аналитического признака каждому образцу присваивается виртуальный класс — «концентрат» или «хвосты» — в зависимости от заданного порога H. Далее на основе лабораторных данных химического анализа рассчитываются показатели выхода, извлечения и контрастности разделения для различных пороговых значений.



Рис.5 - Схема виртуальной сортировки кусковой руды

Динамический характер сортировки проявляется в том, что параметры разделения могут изменяться в зависимости от текущих характеристик поступающей руды, а также при изменении среднего содержания меди и гранулометрического состава целесообразно адаптировать порог аналитического признака для сохранения оптимального соотношения между извлечением полезного компонента и отсечкой пустой породы. Что соответствует концепции динамической сортировки, при которой управляющий параметр изменяется во времени в зависимости от входных условий.

График на рис.6 демонстрирует наличие оптимальной зоны порогов, при которых достигается максимальная эффективность предварительного обогащения. При снижении порога увеличивается выход, но падает качество продукта, тогда как при завышении порога возрастает доля потерь полезного компонента.

Зависимость контрастности разделения и коэффициента обогащения от среднего содержания меди в исходной руде, подтверждает необходимость адаптивной настройки параметров сортировки при изменении качества питания. Эти результаты показывают, что фиксированное пороговое значение не обеспечивает устойчивых технологических показателей при вариациях свойств руды.

Виртуальная сортировка позволяет определить потенциальный эффект предварительного обогащения, сформировать правила управления процессом, а динамическая сортировка рассматривается как развитие данного подхода, ориентированное на адаптацию параметров разделения в режиме реального времени. Полученные результаты подтверждают целесообразность интеграции модуля сортировки в состав программно-аппаратного комплекса и использования аналитических признаков в контуре автоматизированного управления подготовкой сырья перед стадией измельчения и флотации.

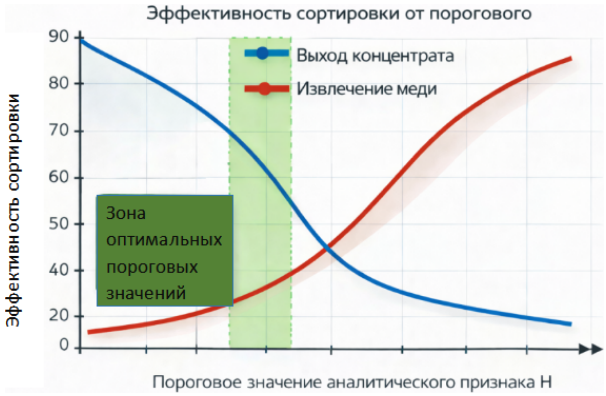


Рис.6 - Зависимость эффективности сортировки от порогового значения аналитического признака H

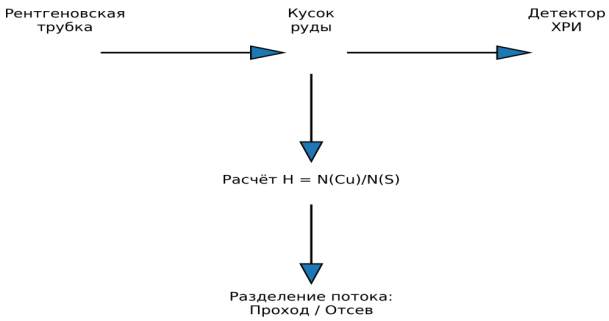


Рис.7 - Принцип рентгенорадиометрической сепарации

Продолжение развития метода является переход от виртуальной сортировки к опытно-промышленным испытаниям с использованием исполнительных механизмов (воздушные или механические отсекатели) и интеграцией алгоритмов принятия решений в систему управления технологическим процессом.

Принцип рентгенорадиометрической сепарации (РРС) заключается в том, что рентгеновская трубка возбуждает характеристическое рентгеновское излучение в куске руды. Детектор регистрирует интенсивность линий меди и рассеянного излучения, после чего вычисляется аналитический параметр $H = N_C u/N_S$. На основе сравнения параметра с заданным порогом выполняется разделение потока на «проход» (в дальнейшую переработку) и «отсев» (в отвал или буфер). Использование спектрального отношения позво-

ляет компенсировать влияние размеров и формы кусков, а также матричного состава породы.

График на рис.8 демонстрирует устойчивую положительную корреляцию между аналитическим параметром *H* и фактическим содержанием меди в руде. Это подтверждает корректность выбора признака сортировки и возможность использования параметра не только для бинарной отсечки пустой породы, но и для управления качеством питания обогатительной фабрики. При увеличении значения *H* наблюдается рост содержания *Cu*, что позволяет реализовать селективное управление рудопотоком.

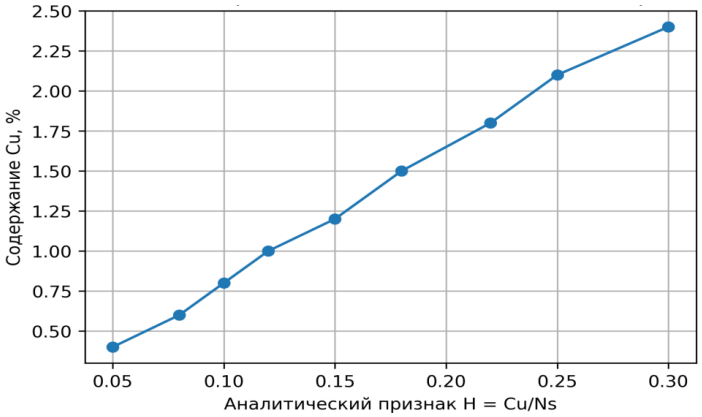


Рис.8 - Зависимость содержания Cu от аналитического признака H

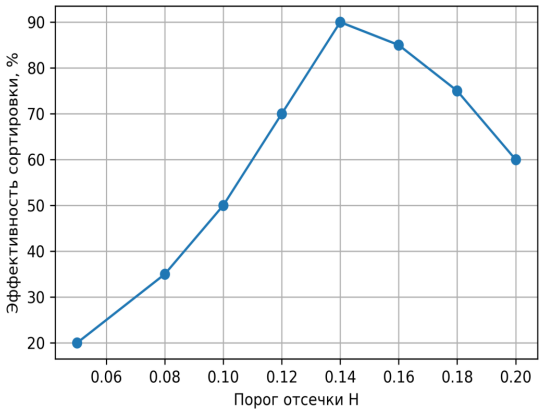


Рис.9 - Эффективность сортировки от порога отсечки H

На графике рис.9 показано, что эффективность предварительного обогащения имеет выраженный максимум в области $H \approx 0{,}14–0{,}15$. При более низких значениях порога происходит недостаточное отделение пустой породы, при более высоких - теряется часть полезного компонента с отсевом. Выбор оптимального порога является ключевым фактором технологической эффективности и должен уточняться при опытно-промышленных испытаниях.

Диаграмма рис.10 иллюстрирует характерную для предварительного обогащения ситуацию, при которой основная часть массы руды (около 70–90%) отсекается как бедная и не направляется на измельчение, тогда как меньшая часть потока, обладающая повышенным содержанием полезного компонента, поступает в дальнейшую переработку. Это обеспечивает значительное снижение энергозатрат на измельчение и повышение эффективности последующих стадий обогащения.

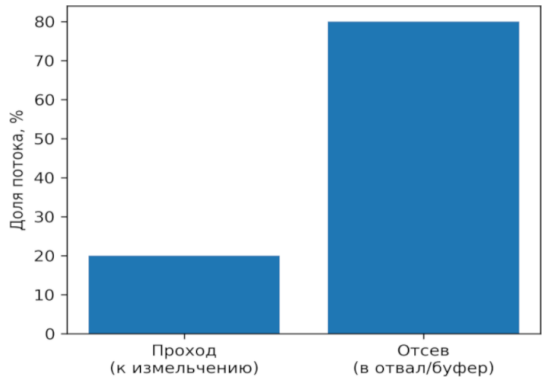


Рис.10 - Баланс рудопотока после предварительного обогащения

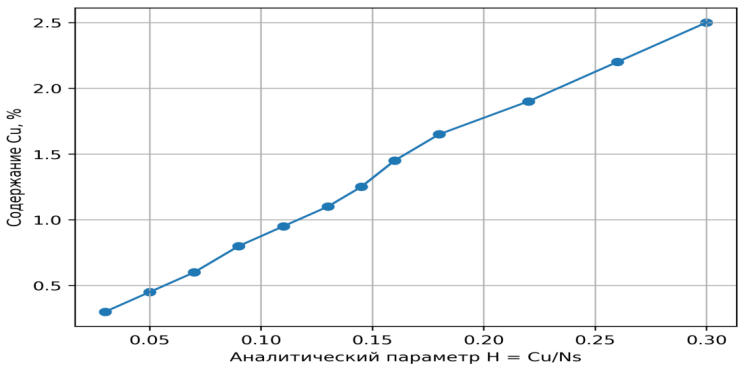


Рис.11 - Лабораторная зависимость содержания Cu от аналитического параметра H

Целью лабораторных испытаний являлась проверка пригодности аналитического параметра $H=N_{Cu}/N_S$ в качестве устойчивого разделительного признака для сортировки руды месторождения Нурказган методом рентгенорадиометрической сепарации.

Валидация включала:

- измерение параметра *H* для отдельных кусков руды;

- определение фактического содержания меди лабораторным анализом;

- анализ зависимости между *H* и *Cu;*

- оценку эффективности сортировки при различных порогах отсечки.

На рис.11 представлена зависимость содержания меди от аналитического параметра *H*, полученная по лабораторным данным.

Из рис.11 видно, что наблюдается устойчивая положительная корреляция между H и содержанием *Cu*.

При H < 0,08 содержание меди, как правило, не превышает 0,5–0,7 %.

При H ≈ 0,14–0,16 содержание меди возрастает до 1,2–1,5 %.

При H > 0,2 содержание меди превышает 1,8–2,5 %.

Это подтверждает, что параметр *H* является информативным и может использоваться для отсечки пустой породы и селективного управления качеством рудопотока.

На рис.12 приведена зависимость эффективности предварительного обогащения от значения порога отсечки аналитического параметра *H*.

Анализ графика показывает:

- при низких порогах (*H* < 0,1) эффективность сортировки низкая из-за слабого отделения пустой породы;

- максимальная эффективность достигается при *H* ≈ 0,14–0,15;

- при дальнейшем увеличении порога часть обогащенной руды начинает уходить в отсев, что снижает общий эффект.

Таким образом, область *H* ≈ 0,14–0,15 может рассматриваться как оптимальный стартовый диапазон порога отсечки, подлежащий дальнейшей оптимизации в опытно-промышленных условиях.

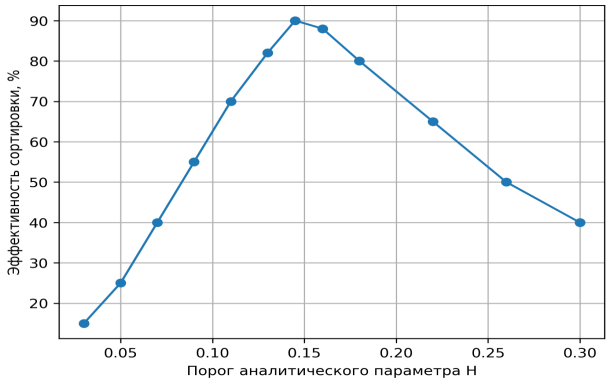


Рис.12 - Эффективность предварительного обогащения в функции порога H

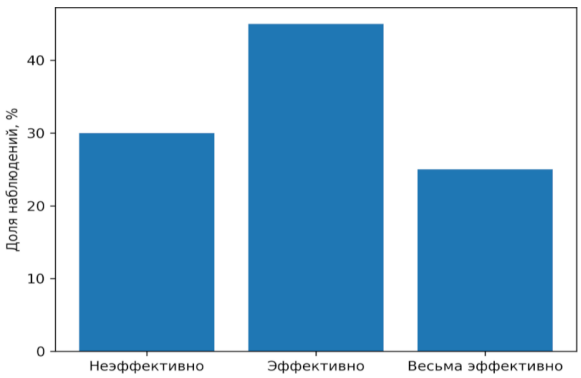


Рис.13 - Классификация зон эффективности сортировки

На основании лабораторных данных режимы сортировки могут быть условно разделены на три зоны рис.13:

- не эффективная - недостаточное отделение пустой породы;

- эффективное-оптимальный баланс между извлечением и отсевом;

- весьма эффективное-максимальное обогащение при ограниченном выходе.

Наибольшая доля наблюдений относится к эф-

фективной зоне, что подтверждает корректность выбранного аналитического параметра и принципиальную реализуемость технологии предварительного обогащения для данной руды.

В таблице 1 приведены результаты лабораторной проверки зависимости аналитического параметра $H=N_{Cu}/N_S$ от фактического содержания меди и эффективности предварительного обогащения.

Таблица 1 - Лабораторная валидация аналитического параметра *H*

№	**Аналитический параметр H**	**Содержание Cu, %**	**Эффективность сортировки, %**
1	0.03	0.3	15
2	0.05	0.45	25
3	0.07	0.6	40
4	0.09	0.8	55
5	0.11	0.95	70
6	0.13	1.1	82
7	0.145	1.25	90
8	0.16	1.45	88
9	0.18	1.65	80
10	0.22	1.9	65
11	0.26	2.2	50
12	0.3	2.5	40

По результатам лабораторных испытаний установлено, что:

- аналитический параметр *H* обладает высокой чувствительностью к содержанию меди;

- обеспечивается контрастное разделение продуктов;

- существует выраженный оптимум порога сортировки;

- параметр пригоден для внедрения в промышленные системы сортировки и цифровые контуры управления.

На рис.14 представлена архитектура программно-аппаратного комплекса предварительного обогащения построена по иерархическому принципу и включает четыре уровня. На измерительном уровне выполняется возбуждение характеристического рентгеновского излучения и регистрация спектров от кусков руды, формируются первичные сигналы по меди и рассеянному излучению. На уровне контроллера сепаратора осуществляется расчет аналитического параметра *H*, временная привязка сигнала к конкретному куску и формирование команды на исполнительные механизмы для разделения потока.

Уровень PLC/SCADA обеспечивает управление технологическим оборудованием, синхронизацию работы узла сортировки с конвейерным транспортом, сбор статистики и передачу данных на верхний уровень.

На уровне MES/AI-модуля выполняется анализ накопленных данных, оптимизация порога отсечки (cut-off) и интеграция ПАК в общий контур управления фабрикой и цифровой двойник процесса. Такая структура обеспечивает как автономную работу узла сортировки, так и его адаптивную настройку в зависимости от каче-

ства руды и технологических показателей обогащения.

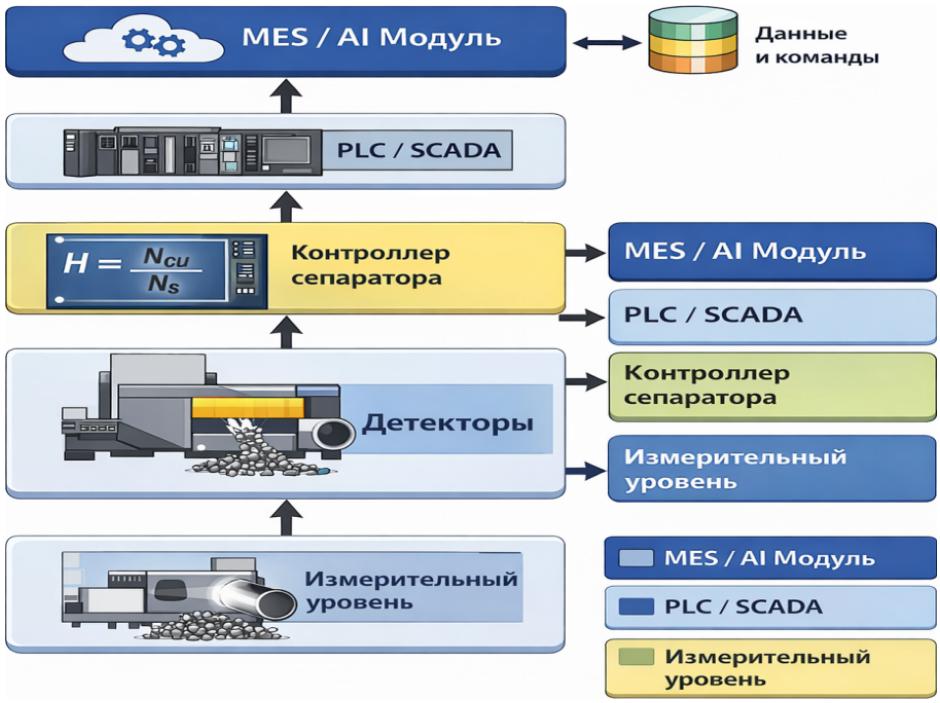


Рис.14 - Архитектура программно-аппаратного комплекса предварительного обогащения

Полученные результаты, показывает, что научная новизна исследования заключается:

- в экспериментальном подтверждении применимости метода спектральных отношений для промышленного онлайн-анализа именно кусковой руды, тогда как большинство известных решений ориентированы на пульпу или порошкообразные пробы. Впервые показано, что параметр *H* сохраняет линейную корреляцию с фактическим содержанием меди в широком диапазоне технологических условий, что позволяет использовать его не только для мониторинга состава, но и как количественный признак для классификации рудного потока;

- интеграции аналитического параметра в архитектуру программно-аппаратного комплекса с возможностью адаптивной корректировки порога отсечки, что формирует основу для перехода от пассивного химического контроля к элементам интеллектуального управления качеством рудопотока.

Выполненное исследование расширяют область применения рентгенорадиометрических методов от задач контроля к задачам оптимизации технологических процессов на основе данных химического анализа.

Выводы. В работе решён комплекс задач, направленных на разработку метода автоматизированного определения химического состава руды в условиях обогатительной фабрики. Сравнительный анализ методов онлайн-контроля (XRF, XRD и PPC) показал, что рентгенорадиометрический метод является наиболее пригодным для поточного анализа кусковой руды без пробоподготовки и легко интегрируется в контуры АСУ ТП.

Экспериментально подтверждена возможность определения содержания меди на основе характеристического рентгеновского излучения с использованием аналитического параметра $H=N_{Cu}/N_S$ обеспечивающего компенсацию матричных и геометрических эффектов.

Установлена устойчивая линейная корреляция между параметром *H* и фактическим содер-

жанием *Cu*, что позволяет использовать данный признак для классификации руды по качеству.

По результатам виртуальной и динамической сортировки определён оптимальный диапазон порога отсечки $H \approx 0{,}14–0{,}15$. В лабораторных условиях получено формирование промпродукта с содержанием *Cu* 3,0–5,0 % при выходе 2–12 % и удаление до 88–98 % массы в виде бедных хвостов, подтверждающее эффективность предварительного обогащения.

Разработана концепция программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего автоматизированный сбор, обработку аналитических данных, а также возможность интеграции в АСУ-ТП фабрики.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на опытно-промышленную валидацию метода, расширение спектра определяемых элементов и интеграцию аналитических данных в цифровые модели процессов для оптимизации режимов обогащения.

Финансирование. Статья подготовлена по результатам исследований в рамках ПЦФ BR28713037 «Разработка программно-аппаратного комплекса на базе технологий искусственного интеллекта для управления процессом флотации на горно-обогатительных предприятиях».

Литература

1. Nigmatulin A., Abdrakhmanova Z., Kan A., Efimenko S., Makarov D. Online X-Ray Fluorescence Monitoring of Coarse Ore for Silver at the Process Conveyors at Kazakhmys Corporation LLC // Journal of the Polish Mineral Engineering Society-2020.-Vol.2(1).-P.145-148. DOI 10.29227/IM-2020-01-56.

2. Abdrakhmanova Z., Kan A., Yun R., Yefimenko S., Makarov D. Online X-ray fluorescence screening of ore for silver at the mines operated by Kazakhmys corporation LLC// Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal.-2021.-Vol.2(2).-P.6-11. DOI 10.5281/zenodo.5594992.

3. Колбин В.В. Методы подготовки реперных образцов почв для неразрушающего РФА-анализа//Вестник НЯЦ РК.- 2022.-Т.3(91).- С. 11-20. DOI 10.52676/1729-7885-2022-3-11-20.

4. Bardzinski P. et al. (2020). Copper Ore Quality Tracking in a Belt Conveyor System Using simulation tools // Natural Resources Research.-2019.-Vol.29(11)- P.1031-1040. DOI 10.1007/s11053-019-09493-6.

5. Sokolov A., Kuzmovs V., Ordóñez U.M., Gostilo V. Online XRF Analysis of Elements in Minerals on a Conveyor Belt // Mining. -2025.-Vol. 5(4):77. DOI 10.3390/mining5040077.

6. Xu Y. Development of Methodological Framework for XRF Sensor Based Ore Sorting Utilizing Machine Learning Approaches// PhD thesis, Mining Engineering (Vancouver)-2024.- 241p. URL: https: //share.google/rEWpSE5KHuutY6DiO. Date of access: 26.12.2025

7. Liu Z. et al. Enhancing XRF sensor-based sorting of porphyritic copper or using particle swarm optimization-support vector machine (PSO-SVM) algorithm //International Journal of Mining Science and Technology. -2024.-Vol.34(4). -P.545-556. DOI 10.1016/j.ijmst.2024.04.002.

8. Peng C. et al. Study on Prediction of Zinc Grade by Transformer Model with De-Stationary Mechanism// Minerals.-2024.-Vol.14(3):230. DOI 10.3390/min14030230.

9. Harmon R.S. et al. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in Mineral Exploration and Ore Processing// Minerals.-2024.-Vol. 14(7): 731. DOI 10.3390/min14070731.

10. Oosthuizen D.J., Craig I.K., Jämsä-Jounela S-L., Sun B. On the current state of flotation modelling for process control//IFAC-PapersOnLine.-2017.-Vol.50(2).-P.19-24. DOI 10.1016/j.ifacol.2017.12.004.

11. Salo M. et al.Active sensing in froth flotation//Int. J. Mining and Mineral Engineering.-2024.-Vol.15(2). -P.111-130. DOI 10.1504/IJMME.2024.10063891.

References

1. Nigmatulin A., Abdrakhmanova Z., Kan A., Efimenko S., Makarov D. Online X-Ray Fluorescence Monitoring of Coarse Ore for Silver at the Process Conveyors at Kazakhmys Corporation LLC // Journal of the Polish Mineral Engineering Society-2020.-Vol.2(1).-P.145-148. DOI 10.29227/IM-2020-01-56.

2. Abdrakhmanova Z., Kan A., Yun R., Yefimenko S., Makarov D. Online X-ray fluorescence screening of ore for silver at the mines operated by kazakhmys corporation LLC// Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal.-2021.-Vol.2(2).-P.6-11. DOI 10.5281/zenodo.5594992.

3. Kolbin V.V. Metody podgotovki repernyh obrazcov pochv dlja nerazrushajushhego RFA-analiza//Vestnik NJaC RK.- 2022.-T.3(91).- S. 11-20. DOI 10.52676/1729-7885-2022-3-11-20.[in Russian]

4. Bardzinski P. et al. (2020). Copper Ore Quality Tracking in a Belt Conveyor System Using simulation tools // Natural Resources Research.-2019.-Vol.29(11)- P.1031-1040. DOI 10.1007/s11053-019-09493-6.

5. Sokolov A., Kuzmovs V., Ordóñez U.M., Gostilo V. Online XRF Analysis of Elements in Minerals on a Conveyor Belt // Mining. -2025.-Vol. 5(4):77. DOI 10.3390/mining5040077.

6. Xu Y. Development of Methodological Framework for XRF Sensor Based Ore Sorting Utilizing Machine Learning Approaches// PhD thesis, Mining Engineering (Vancouver)-2024.- 241p. URL: https: //share.google/rEWpSE5KHuutY6DiO. Date of access: 26.12.2025

7. Liu Z. et al. Enhancing XRF sensor-based sorting of porphyritic copper or using particle swarm optimization-support vector machine (PSO-SVM) algorithm //International Journal of Mining Science and Technology.-2024.-Vol.34(4).-P.545-556. DOI 10.1016/j.ijmst.2024.04.002.

8. Peng C. et al. Study on Prediction of Zinc Grade by Transformer Model with De-Stationary Mechanism// Minerals.-2024.-Vol.14(3):230. DOI 10.3390/min14030230.

9. Harmon R.S. et al. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in Mineral Exploration and Ore Processing// Minerals.-2024.-Vol. 14(7): 731. DOI 10.3390/min14070731.

10. Oosthuizen D.J., Craig I.K., Jämsä-Jounela S-L., Sun B. On the current state of flotation modelling for process control//IFAC-PapersOnLine.-2017.-Vol.50(2).-P.19-24.DOI 10.1016/j.ifacol.2017.12.004.

11. Salo M. et al. Active sensing in froth flotation//Int. J. Mining and Mineral Engineering. -2024.-Vol.15(2). -P.111-130. DOI 10.1504/IJMME.2024.10063891.

Сведения об авторах

Акишев К.М. -к.т.н., ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: akmail04cx@mail.ru;

Подвалов А.Ю.- к.г.н, ТОО «AG TECH», генеральный директор, Астана, Казахстан, e-mail: a.podvalov@ag-tech.kz;

Зейнуллин А.А.- д.т.н., профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: karim_57@mail.ru;

Айбульдинов Е.К. – доктор PhD, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: elaman_@mail.ru;

Нурмаганбетов А.С.- к.т.н, доктор философии (PhD), ассоциированный профессор, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: a.nurmaganbetov@ag-tech.kz;

Чагай М. А.- ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: m.chagay@ag-tech.kz;

Оспанова М.К. - к.ф.-м.н., Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: ospanova_madi_59@mail.ru;

Айтиева М. И.-ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: m.aitiyeva@ag-tech.kz;

Мылтыкбаева Л.А.- к.т.н., Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: L.multykbayeva@gmail.com.

Information about the authors

Akishev K. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: akmail04cx@mail.ru;

Podvalov A.- PhD in Geographic sciences, AG TECH LLP, Kazakhstan, Astana, e-mail: a.podvalov@ag-tech.kz;

Zeynullin A.- Doctor of Technical Sciences, Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: karim_57@mail.ru;

Aibuldinov Y.- PhD, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: elaman_@mail.ru;

Nurmaganbetov A.- Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: a.nurmaganbetov@ag-tech.kz;

Chagai M.- AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: m.chagay@ag-tech.kz;

Ospanova M. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: ospanova_madi_59@mail.ru;

Aitieva M.- AG TECH LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: m.aitiyeva@ag-tech.kz;

Myltykbayeva L - Candidate of Technical Sciences, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: L.multykbayeva@gmail.com.

МРНТИ 61.35.31 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1348**

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАТОМИТА ЗАПАДНОГО КАЗАХСТАНА В ПРОИЗВОДСТВЕ БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА

[1]С. Сатаева, [2]В. Бурахта✉, [3]Н. Джарасова, [1]Т. Өтепова, [1]А. Пшенбаев

[1]Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, Уральск, Казахстан,
[2]Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, Уральск, Казахстан,
[3]Уральская торгово-промышленная компания, Уральск, Казахстан

✉ *Корреспондент-автор: vburakhta@mail.ru*

Благодаря совокупности эксплуатационных свойств боросиликатные стекла активно используются в изготовлении посуды для лабораторных и химических нужд, термостойких изделий и технических компонентов, в том числе для электронной и энергетической отраслей. В работе рассматриваются результаты исследования химического состава местного диатомита, мела и кварцевого песка. Проанализирована возможность использования указанных видов минерального сырья в составе стекольной шихты при получении боросиликатного стекла. Показано, что применение местных материалов является перспективным направлением, позволяющим оптимизировать состав шихты, а также снизить материальные и энергетические затраты в процессе производства.

Ключевые слова: боросиликатное стекло, кварцевый песок, мел, диатомит, химический состав, физико-химические свойства стекла.

PROSPECTS OF DIATOMITE APPLICATION IN WESTERN KAZAKHSTAN IN THE PRODUCTION OF BOROSILICATE GLASS

[1]S. Satayeva, [2]V. Burakhta✉, [3]N. Dharasova, [1]T. Utepova, [1]A. Pshenbayev

[1]Zhangirkhan West-Kazakhstan agrarian technical university, Uralsk, Kazakhstan,
[2]West Kazakhstan Innovative Technology University, Uralsk, Kazakhstan,
[3]Ural Industrial and Trade Company, Uralsk, Kazakhstan,
e-mail: vburakhta@mail.ru

Borosilicate glasses are widely used in the production of laboratory and chemical equipment, heat-resistant and technical products, as well as in the electronic and energy industries, due to their combination of high heat resistance, chemical inertness, and low linear thermal expansion coefficient. The article explores the possibility of using local diatomite, chalk, and quartz sand as components of glass raw materials to produce borosilicate glass. The chemical composition of the raw materials and the physical and chemical properties of the resulting glass are studied. It has been shown that diatomite can partially replace quartz sand without compromising the properties of the resulting glass. The compositions of glass charges using diatomite have been presented. The prospects for using local mineral raw materials to optimize the composition of the charge and reduce material and energy costs have been established.

Keywords: borosilicate glass, quartz sand, chalk, diatomite, chemical composition, physical and chemical properties of glass.

БОРОСИЛИКАТТЫ ШЫНЫ ӨНДІРІСІНДЕ БАТЫС ҚАЗАҚСТАН ДИАТОМИТІН ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

[1]С. Сатаева, [2]В. Бурахта✉, [3]Н. Джарасова, [1]Т. Өтепова, [1]А. Пшенбаев

[1]Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан,
[2]Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті, орал, Қазақстан,
[3]«Орал сауда-өнеркәсіп компания», Орал, Қазақстан,
e-mail: vburakhta@mail.ru

Боросиликатты әйнектер зертханалық және химиялық ыдыстарды, ыстыққа төзімді және техникалық бұйымдарды өндіруде, сондай-ақ жоғары температураға төзімділік, химиялық инерттілік

және төмен сызықтық жылу кеңею коэффициентінің үйлесімі арқасында электронды және энергетикалық өнеркәсіпте кеңінен қолданылды. Мақалада боросиликатты шыны алу үшін шыны шихта құрамында жергілікті диатомит, бор және кварц құмын қолдану мүмкіндігі зерттелді. Бастапқы материалдардың химиялық құрамы және алынған әйнектің физика-химиялық қасиеттері анықталды. Диатомит алынған әйнектің қасиеттерін нашарлатпай, кварц құмын ішінара алмастыра алатындығы көрсетілді. Диатомитті қолданатын шыны шихталардың құрамы келтірілген. Шихта құрамын оңтайландыру және материалдық және энергетикалық шығындарды азайту үшін жергілікті минералды шикізатты пайдалану перспективасы белгіленді.

Түйін сөздер: боросиликатты шыны, кварц құмы, бор, диатомит, химиялық құрамы, шынының физика-химиялық қасиеттері.

Введение. Боросиликатные стекла широко используются при изготовлении лабораторной посуды, термостойких и технических изделий, а также находят применение в электронной и энергетической отраслях. Такой интерес к данным материалам обусловлен их высокой термостойкостью, химической инертностью и пониженным коэффициентом теплового расширения [1,2]. В качестве основного сырья для получения боросиликатных стекол традиционно применяются кварцевые пески [3,4]. Вместе с тем высокая температура стеклообразования и низкая реакционная способность кварца приводят к увеличению энергетических затрат и усложняют процесс получения однородной стекломассы [5-7].

В этой связи актуальной является задача поиска альтернативных источников кремнезёма, использование которых позволило бы снизить температуру формирования стекла без ухудшения его эксплуатационных характеристик. Результаты исследований в области стекольных технологий показывают, что опал-кристобалитовые породы могут рассматриваться как перспективное сырьё для стекловарения. Их отличительной особенностью является высокое содержание аморфного диоксида кремния (до 70 % аморфного SiO_2), а также присутствие в составе других стеклообразующих и модифицирующих оксидов, что способствует интенсификации процессов плавления и гомогенизации шихты. Среди опал-кристобалитовых пород наибольший интерес для стекольной промышленности представляют диатомиты, характеризующиеся относительной стабильностью химического состава (табл.1). Это обстоятельство позволяет рассматривать их как надёжный и воспроизводимый источник кремнезёма при разработке составов стекольных шихт.

Таблица 1 - Химический состав представителей опал-кристобалитовой группы

Название	Содержание оксидов, % масс.						
	SiO2	**Al2O3**	**Fe2O3**	**CaO**	**MgO**	**R2O**	**Δmпр**
Опока	52,1-91,4	2,5-15,4	1,0-5,0	0,43-17,10	0,08-2,48	0,6-4,0	1,5-16,8
Трепел	35,3-86,7	2,5-11,6	0,3-3,4	0,4-31,2	0,2-1,6	0,85-2,10	4,5-11,6
Диато-мит	77,3-83,1	3,3-6,0	1,8-3,5	0,3-0,6	0,6-1,1	0,8-1,5	3,7-8,8
Средняя проба	81,98	5,37	2,67	0,36	0,80	1,47	7,90

Значительные запасы диатомитовых пород, сосредоточенные на территории Западного Казахстана, делают данный материал доступным и экономически целесообразным сырьём [8]. Привлечение местных минеральных ресурсов способствует снижению зависимости предприятий

от дефицитных кварцевых песков, уменьшению транспортных издержек и повышению устойчивости производства. Кроме того, снижение температуры плавления и продолжительности варки стекла при использовании активных кремнезёмсодержащих добавок положительно сказывается на энергопотреблении и уровне выбросов парниковых газов, что соответствует современным требованиям устойчивого развития стекольной отрасли.

Несмотря на наличие работ, посвящённых применению диатомита в силикатных стеклах и стеклокерамических материалах, его использование в боросиликатных системах изучено недостаточно. В связи с этим исследования, направленные на оценку возможности введения природного диатомита в состав боросиликатных стекол, представляются актуальными с точки зрения расширения сырьевой базы, повышения энергоэффективности и развития ресурсосберегающих технологий.

Целью настоящей работы является изучение возможности получения боросиликатного стекла с применением природного диатомита в качестве частичного источника кремнезёма, а также оценка его влияния на основные физико-химические свойства стекла.

В Западном регионе Казахстана, на территории Актюбинской области, расположено месторождение Жалпак, занимающее одно из ведущих мест в мире по запасам диатомита. Минеральный состав сырья и высокая удельная поверхность обусловливают его повышенную реакционную способность в процессе сплавления, что создаёт предпосылки для улучшения технологических и эксплуатационных характеристик готовых стекольных материалов. В связи с этим в работе исследована возможность использования диатомита данного месторождения в качестве компонента стекольной шихты.

Материалы и методы. Элементный и массовый состав природного и модифицированного диатомита был определён методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре «ФОКУС-2М» (табл.2).

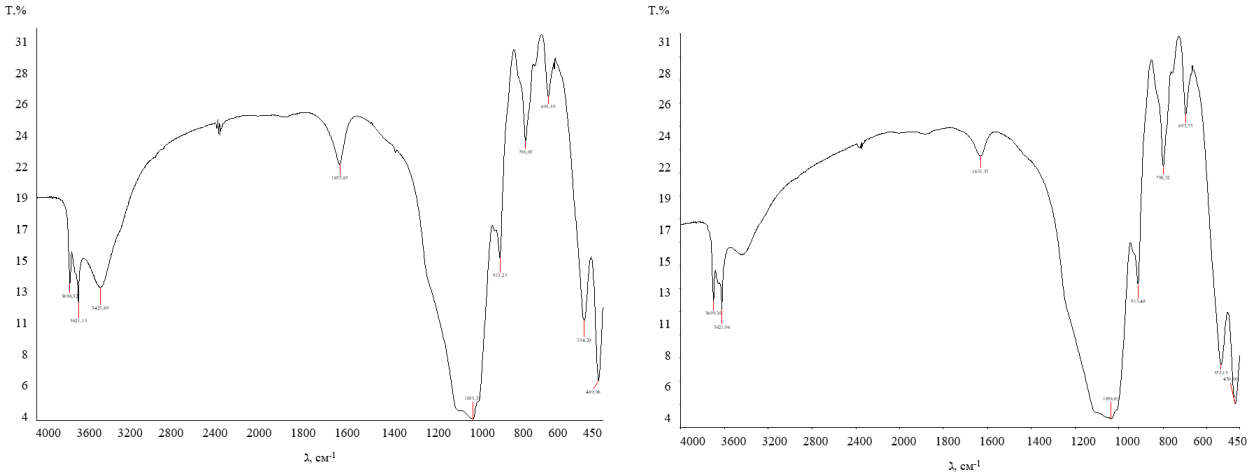
Таблица 2 - Элементный и весовой составы природного и модифицированного диатомита

Элемент	Весовой состав диатомита, %		Интенсивность спектра	
	природный	термически модиф.	природный	термически модиф.
Fe	26,008	35,665	314,53	288,72
Ti	1,582	2,933	11,00	14,93
K	4,589	7,663	6,08	8,01
Ca	0,382	0,548	1,87	2,17
Cr	0,108	0,123	1,17	0,95
Al	24,400	4,364	0,39	0,04
Si	32,283	37,924	1,52	1,69
Cl	1,081	1,308	0,38	0,37
Zn	0,380	0,555	3,58	3,21
Cu	0,228	0,061	1,89	0,31
As	0,237	0,163	2,27	0,98
Rb	0,077	0,348	0,60	1,70

Sr	0,044	0,306	0,35	1,51
Mn	0,055	0,036	0,72	0,39

Выполнен ИК-спектральный анализ диатомита Западного Казахстана с применением ИК Фурье-спектрометра «Varian 3100». На основании литературных источников и экспериментальных исследований установлено, что диатомит в основном представлен аморфным диоксидом кремния (SiO_2) и карбонатом кальция ($CaCO_3$). Нами осуществлён обжиг диатомита в температурном интервале 200-500 °С, в ходе которого происходит удаление химически связанной воды из структуры минерала.

В результате данного процесса наблюдается уплотнение структуры диатомита и существенное увеличение относительной доли диоксида кремния в образце. ИК-спектры исходного и термически обработанного диатомита представлены на рис.1 a, b.



a **b**

Рис.1 - ИК спектры необработанного (a), прокаленного (b) диатомита

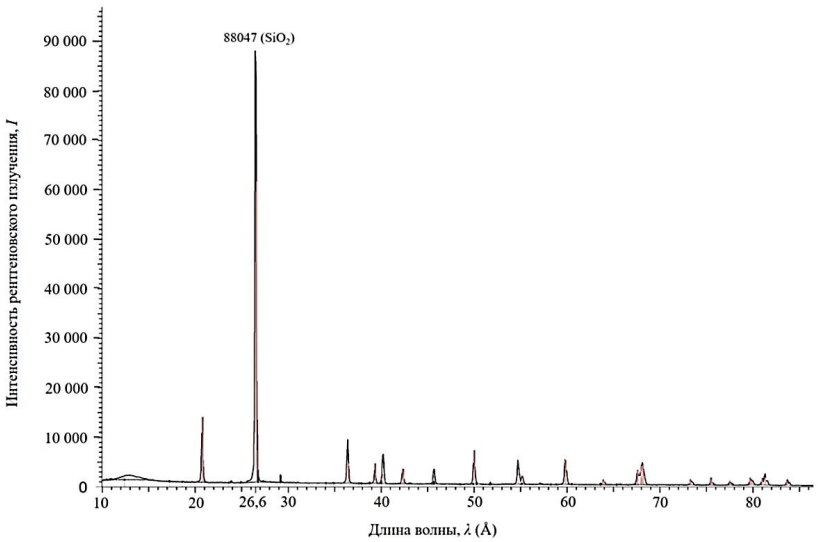


Рис.2 - Рентгенофазовый анализ кварцевого песка

Анализ данных, приведённых на рис.1 (a, b), показывает, что полосы поглощения в диапазоне 400–1000 см ^{1} соответствуют асимметричным колебаниям связей Si-O-Si; при термообработке происходит разрушение связей Si-O-H и формирование более устойчивой кремнекислородной сетки Si-O-Si. Диатомит, применяемый в экспериментальных исследованиях, характеризуется высоким содержанием стеклообразующего оксида SiO_2 (до 68,88%), а также содержит до 12,30 % Al_2O_3 и определённое количество модифицирующих оксидов (Fe_2O_3, R_2O, RO). Сравнительно невысокая массовая доля SiO_2 по отношению к кварцевому песку компенсируется тем, что основной фазой является аморфный опал, обладающий более высокой химической активностью по сравнению с кристаллическим SiO_2.

Проведено исследование состава кварцевого песка месторождения Горбуново Западно-Казахстанской области методом рентгенофазового анализа [9] (рис.2).

Результаты рентгено-фазового анализа (рис.2) свидетельствуют о том, что образец преимущественно представлен кварцем (SiO_2), о чём говорит высокая интенсивность основного пика, характеризующая его значительную степень кристалличности. Пики меньшей интенсивности указывают на наличие незначительных примесных фаз, что подтверждает высокий уровень чистоты исследуемого материала. Результаты ранее выполненных исследований химического состава кварцевого песка месторождения Горбуново Западно-Казахстанской области показали, что материал характеризуется высоким содержанием оксида кремния, при этом суммарная доля оксидов щелочных и щелочноземельных металлов не превышает 0,3 % [10,11].

Результаты и обсуждение. Для синтеза боросиликатного стекла были подготовлены 3 стекольные шихты различных составов:

I состав использовался в качестве контрольного и основан на кварцевом песке в соответствии с нормативными требованиями к химическому составу боросиликатного стекла: % - кварцевый песок - 42, мел - 8, борной кислоты в пересчете на B2O3, - 23, гидрокарбоната натрия в пересчете на Na2O - 18, Al_2O_3 - 7, MgO – 2.

II состав: % - кварцевый песок - 42, диатомит - 10, мел - 8, борной кислоты в пересчете на B2O3- 25, гидрокарбоната натрия в пересчете на Na2O - 15.

III состав: % - диатомит - 52, мел - 8, борной кислоты в пересчете на B2O3 - 25, гидрокарбоната натрия в пересчете на Na2O - 15.

Компоненты каждой шихты тщательно смешивали и помещали в фарфоровые тигли объёмом 100 мл. Далее тигли нагревали в муфельной печи до температуры 1150 °C и выдерживали при этой температуре 60 минут до получения однородного стекольного расплава.

На рис.3 представлены фотографии боросиликатного стекла, полученного из шихты на основе местного кварцевого песка и диатомита.



Рис.3 - Боросиликатное стекло, полученное из шихты на основе местного кварцевого песка и диатомита

Выводы. Результаты исследований подтвердили эффективность применения местного диатомита в составе стекольной шихты в качестве комплексного кремнезёмсодержащего компонента при изготовлении боросиликатного стекла. Высокое содержание аморфного диоксида кремния и наличие функциональных оксидов позволяют диатомиту частично замещать кварцевый песок без снижения физико-химических свойств стекла. Также установлена возможность совместного использования местного мела и кварцевого песка с диатомитом, что обеспечивает оптимизацию состава шихты. Полученные данные свидетельствуют о перспективности внедрения местного минерального сырья для повышения эффективности стекольного производства и снижения материальных и энергетических затрат.

Литература

1. Шакиров А.А., Тлехусеж М.А. Химические процессы при изготовлении стекла // Научное обозрение. Педагогические науки. -2019. -№ 4. -С. 93-96.

2. Макаров Г.И., Макарова Т.М. Молекулярно-динамическое моделирование структуры боросиликатного стекла марки Е по кристаллическому структурному шаблону // Физика и химия стекла. -2023. - Т.49 (6). -С.632-641. DOI 10.31857/S0132665123600498.

3. Елисеева М., Гончарова С.С. Стекло: вещество или материал//Успехи в химии и химической технологии. -2013. - № 27(5). -С.119-122.

4. Шайдуллин С.М., Никулина А.Ю., Ремизов М.Б., Козлов П.В. Термовискозиметрические характеристики боросиликатных стекол для перспективной области легкоплавких составов, разрабатываемых для удаляемого малогабаритного плавителя дизайна Производственного объединения «Маяк». // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. -2024. -Т.335(3). - С.50-60. DOI 10.18799/24131830/2024/3/4569.

5. Шайдуллин С.М., Беланова Е.А., Козлов П.В., Ремизов М.Б., Дворянчикова Е.М. Отработка процесса варки боросиликатных стекол с имитаторами компонентов ВАО и исследование их химической устойчивости // Известия высших учебных заведений. - 2021. -Т.64 (2-2) (759). -С. 148-154. DOI 10.17223/00213411/64/2-2/148.

6. Stefanovsky S.V., Skvortsov M.V., Stefanovsky O.I., Nikonov B.S., Presniakov I.A., Glazkova I.S., Ptashkin A.G. Preparation and characterization of borosilicate glass waste form for immobilization of HLW from WWER spent nuclear fuel reprocessing. MRS Advances. -2017. -Vol.2. - P.583-589. DOI 10.1557/adv.2016.622.

7. Бондаренко Д.О., Бондаренко Н.И., Бессмертный В.С., Изофатова Д.И., Дюмина П.С., Волошко Н.И. Энергосберегающая технология получения силикат-глыбы для производства жидкого стекла // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. -2017. -Т.2(10) 10. - С.111-115. DOI 10.12737/article_59cd0c60148053.59501281.

8. Смирнов П.В., Жакипбаев Б.Е., Староселец Д.А., Дерягина О.И., Баталин Г.А., Гареев Б.И., Вергунов А.В. Диатомиты и опоки месторождений Западного Казахстана: литология, структурно-текстурные параметры, потенциал использования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2023. - №334(7). - С.187–201. DOI: 10.18799/24131830/2023/7/4046.

9. Анваров А.Б., Кадырова З.Р. Обогащение кварцевых песков месторождения «Ойнакум» для синтеза высококачественного прозрачного стекла // Стекло и керамика. -2023. -Т.96(10). -С.48-54. DOI:10.14489/glc.2023.10. pp.048-054.

10. Бурахта В.А., Рамазанова Н.К. Применение кварцевого песка ЗападноКазахстанской области в технологии производства тарного стекла // Вестник ВКГТУ «Технические науки». - 2015. - №4. - С.27-30.

11. Бурахта В.А., Рамазанова Н.К. Определение состава тарного стекла методом растрового электронного микроскопа // Материалы XII Международной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире». - 2015. - С.54-56.

References

1. Shakirov A.A., Tlehusezh M.A. Himicheskie processy pri izgotovlenii stekla // Nauchnoe obozrenie. Pedagogicheskie nauki. -2019. -№ 4. -S. 93-96. [in Russian]

2. Makarov G.I., Makarova T.M. Molekuljarno-dinamicheskoe modelirovanie struktury borosilikatnogo stekla marki E po kristallicheskomu strukturnomu shablonu // Fizika i himija stekla. -2023. - T.49 (6). -C.632-641. DOI 10.31857/S0132665123600498. [in Russian]

3. Eliseeva M., Goncharova S.S. Steklo: veshhestvo ili material//Uspehi v himii i himicheskoj tehnologii. -2013. - № 27(5). -S.119-122. [in Russian]

4. Shajdullin S.M., Nikulina A.Ju., Remizov M.B., Kozlov P.V. Termoviskozimetricheskie harakteristiki borosilikatnyh stekol dlja perspektivnoj oblasti legkoplavkih sostavov, razrabatyvaemyh dlja udaljaemogo malogabaritnogo plavitelja dizajna Proizvodstvennogo ob#edinenija «Majak». // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. -2024. -T.335(3). - S.50-60. DOI 10.18799/24131830/2024/3/4569. [in Russian]

5. Shajdullin S.M., Belanova E.A., Kozlov P.V., Remizov M.B., Dvorjanchikova E.M. Otrabotka processa varki borosilikatnyh stekol s imitatorami komponentov VAO i issledovanie ih himicheskoj ustojchivosti // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. - 2021. -T.64 (2-2) (759). -S. 148-154. DOI 10.17223/00213411/64/2-2/148. [in Russian]

6. Stefanovsky S.V., Skvortsov M.V., Stefanovsky O.I., Nikonov B.S., Presniakov I.A., Glazkova I.S., Ptashkin A.G. Preparation and characterization of borosilicate glass waste form for immobilization of HLW from WWER spent nuclear fuel reprocessing. MRS Advances. -2017. -Vol.2. - P.583-589. DOI 10.1557/adv.2016.622.

7. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyj V.S., Izofatova D.I., Djumina P.S., Voloshko N.I. Jenergosberegajushhaja tehnologija poluchenija silikat-glyby dlja proizvodstva zhidkogo stekla // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. - 2017. -T.2(10) 10. - S.111-115. DOI 10.12737/article_59cd0c60148053.59501281. [in Russian]

8. Smirnov P.V., Zhakipbaev B.E., Staroselec D.A., Derjagina O.I., Batalin G.A., Gareev B.I., Vergunov A.V. Diatomity i opoki mestorozhdenij Zapadnogo Kazahstana: litologija, strukturno-teksturnye parametry, potencial ispol’ zovanija // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. - 2023. - №334(7). - C.187–201. DOI: 10.18799/24131830/2023/7/4046. [in Russian]

9. Anvarov A.B., Kadyrova Z.R. Obogashhenie kvarcevyh peskov mestorozhdenija «Ojnakum» dlja sinteza vysokokachestvennogo prozrachnogo stekla // Steklo i keramika. -2023. -T.96(10). -S.48-54. DOI:10.14489/glc.2023.10. pp.048-054. [in Russian]

10. Burahta V.A., Ramazanova N.K. Primenenie kvarcevogo peska ZapadnoKazahstanskoj oblasti v tehnologii proizvodstva tarnogo stekla // Vestnik VKGTU «Tehnicheskie nauki». - 2015. - №4. - S.27-30. [in Russian]

11. Burahta V.A., Ramazanova N.K. Opredelenie sostava tarnogo stekla metodom rastrovogo

jelektronnogo mikroskopa // Materialy XII Mezhdunarodnoj konferencii «Fundamental’ nye i prikladnye issledovanija v sovremennom mire». - 2015. - S.54-56. [in Russian]

Сведения об авторах

Сатаева С.С. - кандидат химических наук, доктор PhD, ассоциированный профессор, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, Уральск, Казахстан, e-mail: sataeva_safura@mail.ru;

Бурахта В.А. - доктор химических наук, профессор, Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, Уральск, Казахстан, e-mail: vburakhta@mail.ru;

Джарасова Н.К. - магистр технических наук, Уральская торгово-промышленная компания, Уральск, Казахстан, e-mail: jarassova.nurgul@mail.ru;

Өтепова Т.А. - магистрант, Западно-Казахстанский университет им. М.Утемисова, Уральск, Казахстан, e-mail: tlekshi.utepova@mail.ru;

Пшенбаев А.Н. - магистрант, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, Уральск, Казахстан, e-mail: asan12.12.12@mail.ru.

Information about the authors

Satayeva S.S. - Candidate of Chemical Sciences, doctor PhD, associate professor, Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: sataeva_safura@mail.ru;

Burakhta V.A. - Doctor of Chemical Sciences, Professor, West Kazakhstan Innovation and Technology University, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: vburakhta@mail.ru;

Dzharasova N.K. - Master of Engineering Sciences, Ural Industrial and Trade Company, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: jarassova.nurgul@mail.ru;

Utepova T.A. - Master’ s student, M. Utemisov West Kazakhstan University, Uralsk, Kazakhstan, e-mail:tlekshi.utepova@mail.ru;

Pshenbaev A.N. - Master’ s student, Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: asan12.12.12@mail.ru.

МРНТИ 61.01.91 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1392**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

[1]Р.О. Орынбасар, [1]А.Е. Амангалиева✉, [1]Л.К. Тастанова, [1]Г.Ж. Жакупова, [2]А.К. Жумабекова

[1]Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан,
[2]Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан

✉ *Корреспондент-автор: Ashlen002@gmail.com*

В условиях увеличения объемов промышленных отходов остро стоит проблема их утилизации. Одним из перспективных направлений является использование техногенных отходов в качестве наполнителей для полимерных композиционных материалов. В данной обзорной статье рассмотрены современные подходы (2018-2025 гг.) к переработке золы уноса, металлургических шлаков, строительного мусора, красного шлама, стеклобоя и других отходов путем введения их в полимерные матрицы (термопласты, термореактивные смолы и др.). Приведены сведения о влиянии таких наполнителей на механические, физико-химические и термические свойства композитов, выполнен их сравнительный анализ. Отдельное внимание уделено реализованным технологиям и патентам, демонстрирующим практическое применение отходов (например, заполнение ПВХ-материалов золой уноса для труб). Проанализирована экологическая и экономическая эффективность подобной утилизации отходов: снижения нагрузки на полигоны, замещения дефицитных минеральных наполнителей и удешевления продукции. Упомянуты классические работы и приведены ссылки на актуальные исследования последних лет, подтверждающие рост интереса к “зеленым” композитам на основе вторичного сырья. Полученные сведения демонстрируют, что применение техногенных отходов в полимерных композитах – востребованный и оправданный шаг на пути к ресурсосбережению и экологической безопасности.

Ключевые слова: техногенные отходы, наполнители, стеклобой, красный шлам, композит, рециклинг.

USE OF TECHNOGENIC WASTE AS FILLERS FOR POLYMER COMPOSITES

[1]R.O. Orynbasar, [1]A.E. Amangalieva✉, [1]L.K. Tastanova, [1]G.Zh. Zhakupova, [2]A.K. Zhumabekova

[1]K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan,
[2]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,
e-mail: Ashlen002@gmail.com

In conditions of increasing volumes of industrial waste, the problem of their disposal is acute. One of the promising areas is the use of man-made waste as fillers for polymer composite materials. This review article examines modern approaches (2018-2025) to the processing of fly ash, metallurgical slags, construction debris, red sludge, cullet and other waste by introducing them into polymer matrices (thermoplastics, thermosetting resins, etc.). Information is provided on the effect of such fillers on the mechanical, physico-chemical and thermal properties of composites, and their comparative analysis is performed. Special attention is paid to implemented technologies and patents demonstrating the practical use of waste (for example, filling PVC materials with fly ash for pipes). The environmental and economic efficiency of such waste disposal is analyzed: reducing the load on landfills, replacing scarce mineral fillers and reducing the cost of products. Classical works are mentioned and links to current research in recent years are provided, confirming the growing interest in “green” composites based on recycled materials. The information obtained demonstrates that the use of man-made waste in polymer composites is a sought-after and justified step towards resource conservation and environmental safety.

Keywords: man-made waste, fillers, cullet, red sludge, composite, recycling.

ПОЛИМЕРЛІ КОМПОЗИТТЕР ҮШІН ТОЛТЫРҒЫШ РЕТІНДЕ ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРДЫ ПАЙДАЛАНУ

[1]Р.О. Орынбасар, [1]А.Е. Амангалиева, [1]Л.К. Тастанова, [1]Г.Ж. Жакупова, [1]А.К. Жумабекова

[1]Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан,
[2]Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
e-mail: Ashlen002@gmail.com

Өнеркәсіптік қалдықтар көлемінің ұлғаюы жағдайында оларды кәдеге жарату мәселесі өткір болып тұр. Перспективалы бағыттардың бірі-техногендік қалдықтарды полимерлі композициялық материалдар үшін толтырғыш ретінде пайдалану. Бұл шолу мақаласында полимерлі матрицаларға (термопластика, термореактивті шайырлар және т.б.) енгізу арқылы тасығыштың күлін, металлургиялық қождарды, құрылыс қоқыстарын, қызыл шламды, шыны тұнбаны және басқа да қалдықтарды қайта өңдеудің заманауи тәсілдері (2018-2025 жж.) қарастырылған. Мұндай толтырғыштардың композиттердің механикалық, физика-химиялық және термиялық қасиеттеріне әсері туралы мәліметтер келтірілген, сонымен бірге олардың салыстырмалы талдауы жасалды. Қалдықтардың практикалық қолданылуын көрсететін енгізілген технологиялар мен патенттерге ерекше назар аударылады (мысалы, ПВХ материалдарын құбырларға арналған күлмен толтыру). Мұндай қалдықтарды жоюдың экологиялық және экономикалық тиімділігі талданды: полигондарға жүктемені азайту, жетіспейтін минералды толтырғыштарды ауыстыру және өнімді арзандату. Классикалық жұмыстар туралы айтылды және қайталама шикізатқа негізделген ”жасыл” композиттерге деген қызығушылықтың артуын растайтын соңғы жылдардағы өзекті зерттеулерге сілтемелер келтірілді. Алынған мәліметтер полимерлі композиттерде техногендік қалдықтарды қолдану ресурстарды үнемдеу және экологиялық қауіпсіздік жолындағы сұранысқа ие және негізделген қадам екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: техногендік қалдықтар, толтырғыштар, әйнек, қызыл шлам, композит, қайта өңдеу.

Введение. Ускорение промышленного производства неизбежно сопровождается ростом объёмов техногенных отходов, для которых требуется технологически и экологически обоснованная утилизация [1, 2]. К числу наиболее массовых потоков относятся зола уноса, образующаяся при сжигании угля: ежегодно формируется свыше 500 млн тонн, причём более 200 млн тонн по-прежнему не находит полезного применения [3].

Сопоставимую проблему создаёт красный шлам - побочный продукт получения глинозёма: его выпуск оценивают примерно в 150 млн тонн в год, и значительная часть материала длительно накапливается в хвостохранилищах. Металлургический сектор, в свою очередь, генерирует миллионы тонн доменных и сталеплавильных шлаков; строительная индустрия - значительные объёмы строительного мусора; стекольное производство - тонны стеклобоя.

Во многих случаях такие отходы складируются на полигонах, что приводит к изъятию земельных ресурсов и повышает риск загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами и другими токсикантами [2]. По имеющимся оценкам, при сохранении текущих тенденций без заметного улучшения переработки общий объём отходов может превысить 3,4 млрд тонн к 2050 году [1]. Параллельно увеличивается потребность в материалах, получение которых связано с расходованием природного сырья и энергозатратами. Поэтому вовлечение техногенных отходов во вторичный оборот рассматривается не только как природоохранная мера, но и как способ частично заместить первичные ресурсы.

Перспективным направлением здесь выступают полимерные композиционные материалы, в которых дисперсные минеральные фракции (в том числе полученные из отходов) используются как наполнители. Такие добавки позволя-

ют уменьшить долю дорогостоящей полимерной матрицы, снизить себестоимость и одновременно целенаправленно корректировать свойства композита (прочность, жёсткость, износостойкость, термостойкость и др.) [2]. При корректном подборе состава и предварительной обработке техногенное сырьё может работать как функциональный наполнитель, решая одновременно экологическую и инженерную задачи [4]. Интерес к этому подходу сформировался не вчера: ещё Pappu и соавт. (2007) показали возможность замены традиционных наполнителей золой, древесной пылью и красным шламом в полиэфирных композициях [5]. В дальнейшем это направление развивалось в рамках исследований древесно-полимерных композитов и наполнения полимеров минеральными порошками, а в 2018–2025 гг. наблюдается новый всплеск работ по “зелёным” композитам, что хорошо видно по динамике публикаций. Современные работы охватывают широкий спектр отходов: зола электростанций, доменный шлак, шлам байеровского процесса, отходы текстиля, резиновых шин, печатных плат, строительный бой, мраморная пыль и др. [1]. Также исследуются различные полимерные матрицы - термопласты (ПЭ, ПП, ПВХ, полиамиды и др.), реактопласты (эпоксидные, полиэфирные, фенольные смолы), эластомеры (резины, силикон) - для понимания универсальности подхода.

Цель настоящего обзора систематизировать актуальные (2018-2025 гг.) данные о применении техногенных отходов в роли наполнителей полимерных композиционных материалов. Рассматриваются:

- масштабы проблемы и причины, по которым переработка отходов становится технологической необходимостью;

- свойства наиболее распространённых техногенных наполнителей и подходы к их подготовке и введению в полимерную матрицу;

- влияние состава и дисперсности наполнителя на ключевые характеристики композитов;

- сопоставление результатов по разным типам отходов на основе единых критериев; - примеры внедрённых решений и оценка их экологической и экономической результативности.

Научная новизна обзора заключается в том, что он фокусируется на публикациях последних лет и выполняет сопоставление разных групп техногенных отходов в единой логике сравнения, что позволяет выделить устойчивые тенденции и наиболее воспроизводимые практики.

Материалы и методы. Настоящий обзор охватывает публикации 2018-2025 гг., включая работы в международных и отечественных журналах, посвящённые полимерным композитам с техногенными наполнителями. Приоритет отдан экспериментальным исследованиям, где приведены данные о подготовке отходов (фракционирование, сушка, модификация), характеристиках полимерных матриц и результатах испытаний механических, физико-химических и термических свойств полученных композитов. Дополнительно учтены публикации, обобщающие практический опыт применения техногенного сырья в странах СНГ.

Полимерные матрицы. В качестве связующей фазы в рассмотренных работах используются как термопласты, так и термореактивные полимеры.

Среди термопластов наиболее часто встречаются полиолефины - полиэтилен (ПЭ) и полипропилен (ПП), а также поливинилхлорид (ПВХ) [6], полистирол (включая вспененный полистирол и отходы упаковки) и полиамиды [7]. К термореактивным матрицам, применяемым в композитах с техногенными наполнителями, преимущественно относятся эпоксидные, ненасыщенные полиэфирные, фенолформальдегидные и полиуретановые смолы; отдельный пласт работ посвящён эпоксидным системам с различными типами отходов [8]. Для эластомерных матриц описаны силиконовые композиции (например, системы «силикон-резина и красный шлам» для задач ЭМИ-экранирования) [1]. В ряде исследований рассматриваются материалы класса «полимерный бетон» и полимерцементные композиции на основе полиэфирных или эпоксидных связующих с высокой долей минерального наполнителя [8].

Подготовка и модификация наполнителей.

Перед введением в полимер техногенные отходы, как правило, подвергают механической подготовке (дробление/помол до заданной дисперсности), сушке и рассеву. Зола уноса ТЭС изначально представляет собой тонкодисперсный порошок (обычно порядка 1-100 мкм) и во многих работах используется без дополнительного помола; при необходимости выделяют отдельные фракции, включая зольные микросфер полые алюмосиликатные частицы сниженной плотности [9]. Доменный и сталеплавильный шлак, напротив, чаще доводят помолом до порошка с размером частиц менее 100 мкм. Красный шлам, для которого характерна высокая доля частиц <100 мкм, ддополнительно подвергают химической обработке – промыванию и/или кислотной нейтрализации, чтобы снизить щёлочность и повысить совместимость с полимерной матрицей. Стеклобой измельчают, в том числе в шаровых мельницах до стеклянного порошка требуемой дисперсности. Строительные отходы перерабатывают в мелкий заполнитель: удаляют примеси и металл, выполняют дробление, а при необходимости – тонкий помол, особенно для кирпичных отходов [10]. Для улучшения адгезии к полимеру используют химическую модификацию поверхности: обработку силонами, кислотами, нанесение наноструктурированных слоёв. В термопластах широко применяют компатибилизаторы - сополимеры (малеинированный ПП или ПЭ), которые при содержании 2-5% улучшают сцепление полярных минеральных и древесных наполнителей с матрицей. Для эпоксидных смол используют предварительное пропитывание порошка разбавленной смолой либо реагенты, связывающие гидроксильные группы наполнителя с эпоксидом. Это позволяет уменьшить слабость межфазной границы и предотвратить снижение прочности при росте доли наполнителя [1].

Методы изготовления композитов.

Для термопластичных матриц наиболее распространены экструзия и литьё под давлением. Порошкообразный наполнитель вводят в расплав полимера при повышенной температуре, затем композицию гомогенизируют (часто с использованием двухшнекового экструдера) [1]. После этого материал гранулируют или формуют в виде профилей и листов. В лабораторной практике образцы нередко получают методом горячего прессования из предварительно смешанных компонентов. Для термореактивных систем применяют заливку и пресс-формование. Наполнитель диспергируют в жидкой смоле, вводят отвердитель, после чего смесь заливают в формы и проводят отверждение при комнатной либо повышенной температуре, получая, как правило, пластины для последующих испытаний [11]. В полимербетонах и полимер-мортарных композициях доля минеральной фазы может достигать 70-80%. Технология во многом аналогична приготовлению традиционных строительных смесей, однако роль вяжущего здесь выполняет полимерная композиция, отверждаемая воздушным или термическим способом.

Свойства композитов оценивают по стандартным методикам. Механические характеристики обычно включают прочность при растяжении, изгибе и сжатии, модуль упругости, ударную вязкость, твёрдость, износостойкость. К физико-химическим показателям относят плотность, водопоглощение, стойкость к растворителям, а также электроизоляционные и электрофизические параметры.

Термическое поведение изучают через показатели теплостойкости и температуры размягчения, а также методом термогравиметрического анализа (TGA) для оценки термостабильности; для материалов строительного назначения дополнительно анализируют горючесть и воспламеняемость [2]. Полученные результаты сопоставляют с исходной полимерной матрицей без наполнителя и с аналогичными композитами на традиционных минеральных наполнителях, что позволяет корректно оценить вклад техногенных добавок в изменение свойств полимерных материалов.

Обсуждение и результаты. *Виды техногенных наполнителей и их влияние на свойства композитов.*

Анализ публикаций последних лет показы-

вает, что техногенные отходы при корректной подготовке и рациональном подборе концентрации могут выступать эффективными наполнителями полимерных композитов. В ряде случаев они обеспечивают рост отдельных эксплуатационных показателей, а в остальных – позволяют удерживать свойства на приемлемом уровне при одновременном снижении материалоёмкости и себестоимости. Ниже представлены основные группы техногенных наполнителей и обобщены характерные эффекты их введения в различные полимерные матрицы; сводные данные приведены в табл.1.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика техногенных отходов как наполнителей полимерных композитов

Вид техногенного наполнителя	**Основные характеристики**	**Примеры полимерных матриц**	**Влияние на свойства композита (М - механические, Ф - физико-химические, Т - термические)**
Зола уноса (ТЭС)	Силикатно-алюминатная пыль; мелкие сферические частицы.	ПЭ, ПП, ПВХ; эпоксидные и полиэфирные смолы; ДПК.	М: ↑ жесткость и прочность. Ф: ↓ усадка, слегка ↑ водопоглощение. Т: ↑ теплостойкость, ↓ горючесть
Доменный шлак	Кальций-алюмосиликатный порошок/зерна.	Полиамиды, ПВХ, полиэфирные смолы; полимербетон.	М: ↑ жесткость и износостойкость, возможное ↓ прочности на разрыв.Ф: возможное ↑ водопоглощения. Т: ↑ теплостойкость и огнестойкость
Красный шлам	Тонкий щелочной порошок оксидов Fe, Al и др.	Эпоксидные, полиэфирные, винилэфирные смолы; спец. резины.	М: ↑ твердость и прочность на сжатие. Ф: без обработки ухудшает влагостойкость, придаёт красно-коричневый цвет.Т: ↑ огнестойкость, ↓ дымообразование.
Стеклобой	Аморфный SiO_2; остроугольные частицы.	Эпоксидные и полиэфирные композиты; ПП, ПЭ.	М: ↑ микротвердость и износостойкость; при больших дозах ↑ хрупкости.Ф: влагопоглощение ≈ 0; композит матовый. Т: ↑ теплостойкость, ↓ термическое расширение.
Строительный мусор (кирпич, бетон)	Пористый порошок дроблёных керамических и бетонных отходов.	Строительные полимерные композиты, ДПК; ПП, ПС.	М: ↑ модуль и прочность при сжатии; при избытке ↑ хрупкости. Ф: пористые фазы ↑ водопоглощение, керамика частично его снижает.Т: ↑ термостабильность и небольшое ↑ T_9.

Примечание: *стрелками ↑/↓ указано направление изменения свойства при введении наполнителя относительно чистого полимера. Конкретный эффект зависит от процентного содержания наполнителя и его обработки; приведены типичные тенденции.*

Зола уноса электростанций (пылеугольная зола). Зола уноса - мелкодисперсный минеральный порошок (1-100 мкм) на основе оксидов Si, Al и Fe, с плотностью порядка 2,2-2,6 г/см³;

частицы преимущественно сферические, нередко присутствуют полые микросферы, что обеспечивает высокую удельную поверхность и хорошую текучесть. Введение золы уноса в полимерные матрицы исследовано наиболее широко. Механические свойства для термопластов (ПЭ, ПП, ПВХ) добавка золы (до 5-15 мас. %) обычно повышает жесткость и твердость композита за счет заполнения полимерной матрицы жесткими неорганическими частицами [12].

Для композитов с зольным наполнителем в ряде работ фиксируется рост прочности при растяжении и изгибе при умеренных дозировках, обычно в пределах 5-10% [13]. Так, добавление 6% золы уноса в полиэфирную матрицу сопровождалось увеличением прочности на разрыв на 65% и изгибной прочности на 32%. Для полипропилена также описан рост ударной вязкости: максимальный эффект достигался при около 9% наполнения и составлял порядка 74% [13]. При дальнейшем повышении доли наполнителя (более 20-30%) прочностные характеристики нередко ухудшаются, что связывают с агломерацией частиц и недостаточной адгезией на границе раздела «частица-полимер» [1]. В термореактивных системах зольный наполнитель, как правило, повышает модуль и твёрдость, однако влияние на предельную прочность существенно зависит от качества диспергирования и степени смачивания частиц смолой. Из физико-химических эффектов важно учитывать гидрофильность золы: без поверхностной модификации возможно некоторое увеличение водопоглощения, особенно при наличии пористости. Одновременно зольные частицы способны снижать усадку матрицы при отверждении или охлаждении за счёт заполнения объёма и ограничения деформаций полимерной фазы [12]. Наличие тугоплавких оксидов также может повышать термостабильность композитов и уменьшать скорость терморазложения; в работе Shafik и соавт. (2025) показано, что образцы с 40% керамического порошка, близкого по природе к зольным оксидным наполнителям теряли массу при нагреве медленнее и демонстрировали несколько более высокую температуру начала разложения по сравнению с чистым полистиролом [10]. Поскольку зола уноса электрически непроводящая, её введение обычно не приводит к заметному ухудшению электроизоляционных свойств.

Доменные и металлургические шлаки. Доменный шлак является побочным продуктом выплавки чугуна и, как правило, представлен оксидной системой на основе CaO, SiO_2, Al_2O_3 и MgO при плотности порядка 2,8-3,0 г/см³. Для применения в полимерных композитах шлак обычно измельчают до тонкости цемента. По характеру действия в полимерной матрице шлаковый порошок во многом близок к золе уноса, поскольку также состоит из твёрдых оксидных частиц. Наиболее устойчиво в литературе отмечается рост прочности на сжатие и твёрдости, особенно в полимербетонах и полиэфирных композициях строительного назначения [14]. Например, для полиэфирного композита с 15% шлака сообщается увеличение прочности на сжатие на 4%, а изгибной прочности на 21% [15]. В термопластичных матрицах эффекты зачастую более неоднозначны: так, при введении гранулированного доменного шлака в полиамид-6 на уровне 30-40% наблюдали повышение износостойкости и теплостойкости, однако прочность при растяжении снижалась, что объясняют слабым межфазным сцеплением «шлак–полимер» при высоком наполнении [1]. Шлаки, особенно базовые (CaO-rich), способны взаимодействовать с влагой, поэтому композиты с ними могут проявлять умеренный рост водопоглощения и в ряде случаев требуют добавок-стабилизаторов для снижения возможных щелочных эффектов. Вместе с тем пористая структура отдельных шлаковых частиц может способствовать поглощению энергии деформации, что потенциально отражается на ударной вязкости. Термическая стойкость композитов со шлаком обычно улучшается за счёт высокой теплоёмкости и огнестойкости оксидного наполнителя. Дополнительно подчёркивается, что доменные шлаки в большинстве случаев радиационно безопасны и их применение в материалах не приводит к недопустимому росту фонового излучения [2].

Красный шлам. Красный (бокситовый) шлам

представляет собой мелкодисперсный остаток производства глинозёма, содержащий оксиды Fe_2O_3, Al_2O_3 и TiO_2, а также щелочные соединения; для него характерны красно-бурый цвет и повышенная плотность порядка 3,3–3,6 г/см³. При введении умеренных количеств красного шлама композиты обычно демонстрируют рост твёрдости и модуля упругости. Так, в полиэфирной матрице добавки 10-15% шлама увеличивают твёрдость и прочность при сжатии, одновременно повышая плотность материала [15]. Также сообщается об улучшении износостойкости и сопротивления ползучести, что связывают с вкладом твёрдых частиц Fe_2O_3. При чрезмерно высоком наполнении (более 30%) прочность при растяжении может снижаться, поскольку частицы шлама нередко имеют пластинчатую морфологию и способны выступать концентраторами напряжений при изгибе. Отдельный интерес представляет влияние шлама на ударное поведение и демпфирование: в исследовании [11] эпоксидно-бутадиеновая матрица с 50-90% красного шлама демонстрировала повышенную ударопрочность и поглощение энергии удара по сравнению с композитом, наполненным глиноземистым порошком. Щёлочность шлама в составе полимерной матрицы проявляется слабее, однако при недостаточной промывке возможна деградация некоторых полимеров из-за остаточной щёлочи. Композиты с красным шламом нередко уступают по влагостойкости системам с более инертными наполнителями, поэтому могут требовать гидрофобизаторов или иной поверхностной модификации. За счёт высокого содержания Fe_2O_3 шлам способен повышать тепло- и огнестойкость; сообщалось, что введение 20-30% шлама в эпоксидные композиции уменьшает скорость горения и дымообразование. Помимо этого, красный шлам придаёт материалам функциональные свойства, включая электромагнитное экранирование: показано, что смесь красного шлама с углеродными нанотрубками в силиконовой матрице эффективно поглощает СВЧ-излучение и может использоваться как экран электромагнитных помех [16], что иллюстрирует потенциал высокотехнологичных применений данного отхода.

Строительный мусор. Отходы строительной индустрии неоднородны по составу и включают фрагменты бетона, кирпича, керамики и другие минеральные компоненты. Их плотность обычно находится в пределах 2,0–2,5 г/см³. После сортировки, удаления примесей и дробления материал нередко дополнительно размалывают до порошка с размером частиц порядка 100–500 мкм; в таком виде он может применяться как минеральный наполнитель полимерных композитов. По природе это сырьё близко к традиционным наполнителям (песок, кварцевые порошки), поэтому его введение обычно повышает модуль упругости и может умеренно увеличивать прочность при сжатии. Вместе с тем прочность при растяжении и изгибе иногда снижается из-за слабого межфазного контакта между полимером и частицами «старого» цементного камня. Так, в работе Keskisaari и соавт. (2016) добавление порошка кирпича и бетона в древесно-полимерный композит привело к росту плотности и жёсткости, однако прочность в целом сохранилась на уровне материала без наполнителя [17]. Более свежие исследования показывают, что потенциал строительных отходов существенно раскрывается при грамотном подборе фракционного состава и комбинации компонентов. Shafik и соавт. (2025) получили композиты на основе отходов упаковочного полистирола, усиливая их гибридными наполнителями из древесной стружки, керамической крошки и кирпичного боя [10]. Оптимальная композиция (20% керамики и 20% древесины) обеспечила более чем двукратный рост прочности при растяжении, а керамическая составляющая одновременно заметно снизила влагопоглощение и улучшила термическую устойчивость: на термограммах образцы с кирпичным и керамическим наполнителем характеризовались меньшей скоростью разложения и более поздним началом деструкции [10]. В результате можно заключить, что при корректной подготовке и подборе состава строительные отходы, особенно керамическая фракция, способны выполнять роль эффективного наполнителя для композитов строительного назначения, повышая как прочностные, так и долговечностные характеристики. При этом

такие материалы сохраняют диэлектрические свойства, достаточные для применения в изоляционных изделиях; в частности, для композитов с кирпичным порошком отмечены низкие диэлектрические потери и проводимость [10].

Стеклобой (отходы стекла). Битое стекло после помола представляет собой стеклянный порошок, химически близкий к силикатным наполнителям, примерно 70-75% SiO_2 с присутствием Na_2O и CaO при плотности около 2,5 г/см³. По составу стеклопорошок сопоставим с кварцевыми наполнителями, однако отличается гладкой поверхностью частиц, что может снижать межфазное сцепление без специальных приёмов модификации. В композитах стеклобой чаще всего ведёт себя как инертный минеральный наполнитель, повышая твёрдость и улучшая стойкость к царапанию и истиранию. Например, для эпоксидных покрытий показано, что введение тонкоизмельчённого стекла увеличивает микротвёрдость по Виккерсу и повышает абразивную стойкость по сравнению с чистой эпоксидной смолой [18]. Прочность при изгибе и растяжении при умеренном содержании стеклопорошка (порядка 5-10%) может незначительно возрастать, тогда как при высоких долях (более 30%) возможно снижение прочности из-за концентрации напряжений у острых граней стеклянных частиц [19]. Важным преимуществом стеклянного наполнителя является крайне низкое влагопоглощение, поэтому композиты обычно сохраняют невысокое водопоглощение; стекло также является диэлектриком, и электрические изоляционные характеристики, как правило, не ухудшаются. При этом оптические свойства пластика меняются ожидаемо: прозрачность падает, материал становится мутным. Благодаря высокой термостойкости стекло способно повышать теплостойкость композита и сдвигать температурные характеристики в сторону более стабильного поведения при нагреве (эффект зависит от матрицы и наполнения). Для полимербетонов на полиэфирных или эпоксидных связующих замена части кварцевого песка стеклобоем приводила к росту прочности при сжатии (примерно на 5–10%) и увеличению изгибной прочности (до +3 МПа) [9], что связывают с высокой прочностью стеклянных частиц и их плотной упаковкой в матрице. Таким образом, стеклобой может рассматриваться как практичная альтернатива коммерческим кварцевым наполнителям и микрокальциту, переводя стекольные отходы в ресурс для производства материалов.



Рис.1 - Качественная оценка влияния различных техногенных отходов на свойства полимерных композитов

Прочие техногенные наполнители. Помимо перечисленных, в последние годы активно изучаются и другие потоки отходов. Резиновая крошка из изношенных шин используется для повышения упругости и демпфирования и находит применение в асфальтополимерных системах и ряде полимерных композитов [20]. Текстильные отходы (например, измельчённые джинсовые ткани) рассматривались как волокнистый наполнитель в биоразлагаемых матрицах и в отдельных работах способствовали росту прочности при растяжении [21]. Отходы электронной промышленности также представляют интерес: после удаления металлов неметаллическая фракция печатных плат измельчается и вводится в термопласты и термореактивные смолы, повышая жёсткость и огнестойкость, хотя ударная вязкость при этом может снижаться [22- 24]. Отдельно стоит отметить применение золы и шлаков в геополимерных системах [23]; хотя это уже относится к неорганическим матрицам, по сути, речь идёт о композитах, где отходы замещают цементное сырьё. В рамках обзо-

ра, ориентированного на полимерные матрицы, общий вывод остаётся одинаковым: большинство минеральных порошковых отходов при соответствующей подготовке способны работать как наполнители, обеспечивая свойства, сопоставимые с традиционными минеральными добавками, а иногда и придавая материалам дополнительные функциональные эффекты.

Сравнительные результаты физико-химических исследований полимерных композитов с техногенными наполнителями. Обобщение литературных данных [1,5] показывает, что техногенные минеральные наполнители по-разному влияют на ключевые физико-химические характеристики полимерных композитов – плотность, водопоглощение, усадку, термостабильность и огнестойкость. В большинстве работ введение порошков отходов приводит к росту плотности и уменьшению усадки по сравнению с чистой матрицей за счёт замещения части объёма полимера более плотной неорганической фазой и снижения доли усадочной составляющей [7, 8].

По влиянию на водопоглощение и влагостойкость можно условно выделить две группы систем. Относительно инертные наполнители – зола уноса, стеклобой при умеренном содержании (до ~10-20 мас. %) лишь слабо увеличивают водопоглощение либо сохраняют его на уровне исходного полимера благодаря низкой открытой пористости частиц и практически отсутствующей собственной сорбционной способности [6, 9]. Наполнители с развитой пористостью и/или щелочной поверхностью, такие как красный шлам и строительный мусор (бетонный и кирпичный бой), напротив, вызывают заметный рост водопоглощения и снижение влагостойкости композитов [3, 18]. Показано, что применение поверхностных модификаторов и компатибилизаторов позволяет частично нивелировать этот эффект и сохранить приемлемый уровень прочности [20,21]. Большинство техногенных наполнителей улучшает термостабильность и огнестойкость материалов. Зола уноса, шлаки, стеклобой и красный шлам, состоящие преимущественно из тугоплавких оксидов, повышают температуру начала термического разложения, уменьшают скорость потери массы при нагреве и в ряде случаев снижают горючесть и дымообразование [5, 9, 16]. Это особенно характерно для композитов строительного и электротехнического назначения. При этом электрофизические свойства многих систем (зола уноса, стеклобой, значительная часть строительных отходов) остаются на уровне исходных полимеров, что позволяет использовать такие композиты в качестве конструкционно-изоляционных материалов [19, 21].

Рассмотренные результаты подтверждают, что техногенные отходы могут успешно выполнять функцию наполнителей, во многом аналогичную традиционным (кальцит, тальк, стекловолокно), и в некоторых случаях придавать композитам уникальные свойства. Встает вопрос, насколько эта концепция реализована на практике и каковы ее преимущества с точки зрения экологии и экономики?

С экологической точки зрения выгоды очевидны. Каждая тонна отходов, вовлечённая во вторичное использование, это тонна, не отправленная на полигон. Использование техногенных наполнителей снижает потребность в добыче и производстве первичных наполнителей (карбонатных, силикатных), а значит, уменьшает связанную с этим нагрузку на природу. Снижение объема захороняемых отходов напрямую способствует защите почв и вод от потенциального загрязнения тяжелыми металлами, которые присутствуют в некоторых отходах. Заливка таких отходов в полимер фактически иммобилизует опасные элементы в твердой матрице, предотвращая их вымывание [24]. Например, композиты на основе красного шлама могут служить барьером для тяжелых металлов вместо хранения жидкой шламовой пульпы, ее можно включить в полимербетонные блоки, безопасные при эксплуатации. В случае золы уноса использование в композитах устраняет проблему ветровой эрозии золоотвалов. Производство полимеров обычно сопровождается выбросами CO_2, но добавление наполнителя сокращает долю полимера в продукте. “Углеродный след” отхода услов-

но нулевой (или даже отрицательный, учитывая, что в противном случае мог бы выделяться метан при захоронении органических отходов). Таким образом, наполненные отходами пластики могут иметь меньший углеродный след на единицу изделия, чем чистые пластики.

Следует, впрочем, отметить, что экологический эффект должен подтверждаться оценкой жизненного цикла. Не все отходы одинаково безопасны. Например, зола и шлам могут содержать радиоактивные элементы. Требуется контроль радиационной активности как упоминалось, многие золы проходят по первому классу ($А_{эфф}$ < 370 Бк/кг) и пригодны для использования [2]. Если же отход имеет повышенный радиационный фон или сильно токсичен, его применение в массовых изделиях ограничено санитарными нормами. Полимерные композиты с отходами должны тестироваться на вымывание и эмиссию вредных веществ. В большинстве случаев инкапсуляция в полимер надежно удерживает загрязнители. Например, испытания геополимеров с красным шламом показали минимальное выщелачивание тяжелых металлов [11]. Аналогично, зола уноса в ПВХ-композите не высвобождает вредных веществ даже при контакте с водой, что позволяет использовать такие материалы в несущих конструкциях и несжатых изделиях без риска для окружающей среды.

Экономические выгоды двоякие. Для производителей материалов это удешевление сырья, для предприятий-отходообразователей это снижение расходов на утилизацию. Минеральные наполнители традиционно стоят значительно дешевле полимеров. В случае техногенных отходов цена наполнителя может быть вовсе нулевой или отрицательной, когда полигон берет плату за прием отхода. Как отмечают исследователи, добавление дешевого наполнителя вместо части полимера - это прямой путь к удешевлению продукции [12]. Например, если 30% дорогого эпоксидного связующего заменить золой, стоимость композита снизится, а прочностные характеристики могут даже вырасти. Это обусловлено тем, что себестоимость заполненного композита ниже, а получаемые свойства все еще находятся на приемлемом уровне. Более того, во многих случаях снижение прочности вовсе не происходит, как мы видели, иногда прочность растет. Таким образом, экономическая целесообразность доказана. Композиты на отходах конкурируют по свойствам с обычными, но обходятся дешевле в производстве. Для предприятия, генерирующего отход, создание продукта с его использованием означает превращение пассива в актив. Например, теплоэлектростанция, передавая золу в производство композитов, экономит на эксплуатации золоотвалов и может получать доход от продажи золы как сырья. В Алтайском крае уже практикуется передача золы ТЭЦ дорожно-строительным предприятиям, что местные власти поддерживают как более экологичный и выгодный способ обращения с отходом [25]. Конечно, есть и затраты. Требуется оборудование для помола, сушки отходов, добавки для улучшения совместимости, контроль качества. При масштабном производстве они, как правило, окупаются. Экономический анализ Барахтенко В.В. (2018) показал, что оптимизация рецептур ПВХ-зола композита позволяет добиться прочности на уровне стандартов, при этом снижение себестоимости достигает нескольких десятков процентов за счет замещения ПВХ золой [2].

Несмотря на очевидные плюсы, применение техногенных наполнителей требует учета некоторых моментов. Во-первых, нестабильность состава отходов. Качество, химический состав могут варьировать от партии к партии, усложняя стандартизацию. В качестве решении - тщательная входная характеристика сырья, возможно, смешение больших объемов для усреднения параметров. Во-вторых, необходимость измельчения до тонкой фракции. Это энергозатратно, и слишком крупный наполнитель ведет к плохим свойствам. Однако современные мельницы и классификаторы способны готовить ультрадисперсные порошки, более того, у многих отходов уже изначально мелкая фракция. В-третьих, износ оборудования. Абразивные частицы, как шлаки и стекла могут повышать износ экструдеров и смесителей. Здесь пригодятся твердые наплавки на шнеки или выбор оборудования, рас-

считанного на минералонаполненные смеси. В-четвертых, логистика: для эффективного внедрения желательно, чтобы поблизости от места образования отхода было производство пластмасс или стройматериалов. Именно поэтому особенно перспективна тема на стыке отраслей. Например, при ТЭС организовать производство блоков или панелей из золонаполненного композита, или при металлоплавильном заводе – цех композитных изделий с шлаком. Такой подход укладывается в концепцию промышленных симбиозов и циркулярной экономики.

Как следует из обобщённых сравнительных данных по физико-химическим характеристикам композитов с техногенными наполнителями [1-9, 13-23], большинство таких систем обеспечивает повышение термостойкости и жёсткости при допустимом росте водопоглощения.

Научные исследования продолжаются, разрабатываются нанокомпозиты с отходами, комбинированные наполнители, а также биополимерные композиты с техногенными отходами, что позволяет получать более экологичные продукты на всём жизненном цикле [26]. Интерес представляет и аддитивное производство: эксперименты с 3D-печатью пластиками, наполненными порошками золы или древесных отходов, показали возможность создания сложных деталей из таких материалов [27].

Выводы. Анализ работ 2018-2025 годов показывает, что использование техногенных отходов в качестве наполнителей для полимерных композитов – это устойчивое и уже хорошо обоснованное направление, позволяющее одновременно решать задачи утилизации отходов и снижения расхода первичных ресурсов. Практически все основные типы полимерных матриц могут быть успешно наполнены золой уноса, шлаками, красным шламом, строительным мусором, стеклобоем и другими минеральными порошками при условии правильной подготовки и модификации наполнителя. В большинстве случаев техногенные наполнители повышают жёсткость, модуль упругости, твердость и термостойкость композитов. Наиболее перспективной областью применения остаются строительные и электротехнические материалы. Экологический и экономический эффект связан с уменьшением объёмов отходов, снижением нагрузки на полигоны и удешевлением продукции за счёт замещения части полимера дешёвым вторичным сырьём. Дальнейшее развитие направления связано со стандартизацией вторичных наполнителей, накоплением инженерного опыта, применением нано- и поверхностных модификаций для улучшения межфазного взаимодействия, а также с оценкой жизненного цикла материалов.

Литература

1. Muthukutti G.P., Singh M.K., Palaniappan S.K., et al. Value-added polymer composites using non-metallic industrial waste: A concise review // Chemical Engineering Journal. -2025. -Vol.512: 162344. DOI 10.1016/j.cej.2025.162344.

2. Барахтенко В.В., Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В. Оценка эффективности применения промышленных отходов в качестве наполнителя поливинилхлоридных композиций // Строительство и реконструкция. -2018. -№ 6 (80). - С.74–80.

3. Banda M. F., Matabane L., Munyengabe A. A phytoremediation approach for the restoration of coal fly ash polluted sites: A review // Heliyon. -2024. -Vol.10(23): e40741. DOI 10.1016/j.heliyon.2024.e40741.

4. Барахтенко В.В. Строительный композиционный материал на основе отходов ПВХ и золы уноса ТЭЦ: автореф. дис. по ВАК РФ 05.23.05. Санкт-Петербург: СПбГАСУ. -2014.

5. Pappu A., Saxena M., Asolekar S. R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials // Building and Environment. -2007. -Vol.42(6). -P.2311-2320. DOI 10.1016/j.buildenv.2006.04.015.

6. Evans L., Harrison P., Lawrence J., Casell J., Thiemann D., Kim J. Coal Ash Primer/Earthjustice. -2023. – 34 p.

7. Jagadeesh P., Puttegowda M., Thyavihalli Girijappa Y.G., Rangappa S.M., Siengchin S. Effect of natural filler materials on fiber reinforced hybrid polymer composites: An overview // Journal of Natural Fibers. -2020. -Vol.19(11). -P.4132–4147. DOI 10.1080/15440478.2020.1854145.

8. Ağcan A.E., Kartal İ. A Review of Waste-Derived Fillers for Enhancing the Properties of Epoxy Resins // International Journal of Adhesion and Adhesives. -2025. -Vol.138: 103944. DOI 10.1016/j.ijadhadh.2025.103944.

9. Saribiyik M., Piskin A., Saribiyik A. The effects of waste glass powder usage on polymer concrete properties // Construction and Building Materials. -2013. -Vol.47. -P.840-844. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.023.

10. Shafik E.S., Wissa D.A., Labeeb A.M., Ward A.A., Abd-El-Messieh S.L. Green polymeric composites based on construction and packaging waste: toward advanced insulating materials // Scientific Reports. -2025. -Vol.15:38495. DOI 10.1038/s41598-025-22450-z.

11. Melnyk L., Sviderskyy V. Development of multifunctional polymer composites with high red mud content // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. -2024. -Vol.6. -No.12(132). - P.34-43. DOI 10.15587/1729-4061.2024.317952.

12. Colmar J., McBay A. Fly ash filler and polyvinyl chloride compositions and conduits therefrom/ Patent publication number: 20020040084. -2002.

13. Nagaraja S., Anand P.B., Ammarullah M.I. Influence of fly ash filler on the mechanical properties and water absorption behaviour of epoxy polymer composites reinforced with pineapple leaf fibre for biomedical applications // RSC Advances. -2024. -Vol.14(21). -P.14680-14696. DOI:10.1039/d4ra00529e.

14. Rachchh N.V., Misra R.K., Roychowdhary D.G. Effect of red mud filler on mechanical and buckling characteristics of coir fibre-reinforced polymer composite // Iranian Polymer Journal. -2015. -Vol.24(3). P. 253-265. DOI 10.1007/s13726-015-0317-4.

15. Sarde B., Patil Y.D., Dholakiya B., Pawar V. Evaluation of effect of red mud and fly ash as filler on the properties of modified PET resin polymer mortar composite // Innovative Infrastructure Solutions. -2025. -Vol.10(3). -P.1-12. DOI10.1007/s41062-025-01922-1.

16. Oral I., Özmeral N., Ahmetli G., Guzel H. Elastic and acoustic properties determination of epoxy/polystyrene/nanoclay/red mud waste hybrid composites by ultrasonic method // Polymer Composites. -2025. -Vol.46(1). -P.930–948. DOI 10.1002/pc.29224.

17. Keskisaari A., Butylina S., Kärki T. Use of construction and demolition wastes as mineral fillers in hybrid wood–polymer composites // Journal of Applied Polymer Science. -2016. -Vol. 133(19). DOI 10.1002/app.43412,

18. Buaphuen P., Makcharoen W., Vittayakorn W. The enhancement of polymer composite coating by using a waste glass powder as alternative reinforcement // Ferroelectrics. -2022. -Vol.601(1). -P.151-163. DOI 10.1080/00150193.2022.2130771.

19. Bal B.C., Narlioglu N. Effect of waste glass reinforcements particle size on some properties of HDPE-based composites // Tribology and Materials. -2025. -Vol.4(1). -P.29–37. DOI:10.46793/tribomat.2025.001.

20. Abdulhameed J.I., Ali A.H., Kara İ.H., Mahan H.M., Konovalov S.V., Al-Nedawi N.M. Preparing eco-friendly composite from end-life tires and epoxy resin and examining its mechanical, and acoustic

insulation properties // International Journal of Nanoelectronics and Materials. -2024. -Vol.17(1). -P.1-5. DOI 10.58915/ijneam.v17i1.514.

21. Shafqat A.R., Hussain M., Nawab Y., Ashraf M., Ahmad S., Batool G. Circularity in materials: a review on polymer composites made from agriculture and textile waste // International Journal of Polymer Science. -2023. -Vol.2023(1): 5872605. DOI 10.1155/2023/5872605.

22. Wang X., Fu C., Feng Z., Huo H., Yin X., Gao G., et al. Flyash/polymer composite electrolyte with internal binding interaction enables highly-stable extrinsic-interfaces of all-solid-state lithium batteries // Chemical Engineering Journal. -2022. -Vol.428: 131041. DOI 10.1016/j.cej.2021.131041.

23. Герасимова Н.П. Установка для интенсификации процесса затвердевания бетона с использованием золы уноса ТЭЦ // Вестник ИрГТУ. -2016. -№ 7(114). -С.126-132. DOI 10.21285/1814-3520-2016-7-126-132.

24. Flores-Campos R., Deaquino-Lara R., Rodríguez-Reyes M., Martínez-Sánchez R., Estrada-Ruiz R.H. The use of nonmetallic fraction particles with the double purpose of increasing the mechanical properties of low-density polyethylene composite and reducing the pollution associated with the recycling of metals from e-waste // Recycling. -2024. -Vol.9(4): 56. DOI 10.3390/recycling9040056.

25. Кузнецова Т.В. В Алтайском крае используют золу Барнаульской ТЭЦ для ремонта дорог// Российская газета. -2025. - ЭЛ № ФС 77 -50379.

26. Chaturvedi A.K., Gupta M.K., Pappu A. The role of carbon nanotubes on flexural strength and dielectric properties of water sustainable fly ash polymer nanocomposites // Physica B: Condensed Matter. -2021.-Vol. 620: 413283. DOI 10.1016/j.physb.2021.413283.

27. Mojapelo K.S., Kupolati W.K., Burger E.A., Ndambuki J.M., Snyman J., Sadiku E.R. Recent progress in preparation, improvement and applications of green polymer composites // Biopolymers. -2025. -Vol. 116(6): e70059. DOI 10.1002/bip.70059.

References

1. Muthukutti G.P., Singh M.K., Palaniappan S.K., et al. Value-added polymer composites using non-metallic industrial waste: A concise review // Chemical Engineering Journal. -2025. -Vol.512: 162344. DOI 10.1016/j.cej.2025.162344.

2. Barahtenko V.V., Burdonov A.E., Zelinskaja E.V. Ocenka jeffektivnosti primenenija promyshlennyh othodov v kachestve napolnitelja polivinilhloridnyh kompozicij // Stroitel’ stvo i rekonstrukcija. -2018. -№ 6 (80). -S.74–80. [in Russian]

3. Banda M. F., Matabane L., Munyengabe A. A phytoremediation approach for the restoration of coal fly ash polluted sites: A review //Heliyon. -2024. -Vol.10(23): e40741. DOI 10.1016/j.heliyon.2024.e40741. [in Russian]

4. Barahtenko V.V. Stroitel’ nyj kompozicionnyj material na osnove othodov PVH i zoly unosa TJeC: avtoref. dis. po VAK RF 05.23.05. Sankt-Peterburg: SPbGASU. -2014. [in Russian]

5. Pappu A., Saxena M., Asolekar S. R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials //Building and Environment. -2007. -Vol.42(6). -P.2311–2320. DOI 10.1016/j.buildenv.2006.04.015.

6. Evans L., Harrison P., Lawrence J., Casell J., Thiemann D., Kim J. Coal Ash Primer/Earthjustice. -2023. -34 p.

7. Jagadeesh P., Puttegowda M., Thyavihalli Girijappa Y.G., Rangappa S.M., Siengchin S. Effect of natural filler materials on fiber reinforced hybrid polymer composites: An overview // Journal of Natural Fibers.

-2020. -Vol.19(11). -P.4132–4147. DOI 10.1080/15440478.2020.1854145.

8. Ağcan A.E., Kartal İ. A Review of Waste-Derived Fillers for Enhancing the Properties of Epoxy Resins // International Journal of Adhesion and Adhesives. -2025. -Vol.138: 103944. DOI 10.1016/j.ijadhadh.2025.103944.

9. Saribiyik M., Piskin A., Saribiyik A. The effects of waste glass powder usage on polymer concrete properties // Construction and Building Materials. -2013. -Vol.47. -P.840-844. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.023.

10. Shafik E.S., Wissa D.A., Labeeb A.M., Ward A.A., Abd-El-Messieh S.L. Green polymeric composites based on construction and packaging waste: toward advanced insulating materials // Scientific Reports. -2025. -Vol. 15:38495. DOI 10.1038/s41598-025-22450-z.

11. Melnyk L., Sviderskyy V. Development of multifunctional polymer composites with high red mud content // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. -2024. -Vol.6. -No.12(132). -P.34-43. DOI 10.15587/1729-4061.2024.317952.

12. Colmar J., McBay A. Fly ash filler and polyvinyl chloride compositions and conduits therefrom/ Patent publication number: 20020040084. -2002.

13. Nagaraja S., Anand P.B., Ammarullah M.I. Influence of fly ash filler on the mechanical properties and water absorption behaviour of epoxy polymer composites reinforced with pineapple leaf fibre for biomedical applications // RSC Advances. -2024. -Vol.14(21). -P.14680-14696. DOI10.1039/d4ra00529e.

14. Rachchh N.V., Misra R.K., Roychowdhary D.G. Effect of red mud filler on mechanical and buckling characteristics of coir fibre-reinforced polymer composite // Iranian Polymer Journal. -2015. -Vol.24(3). P. 253-265. DOI 10.1007/s13726-015-0317-4.

15. Sarde B., Patil Y.D., Dholakiya B., Pawar V. Evaluation of effect of red mud and fly ash as filler on the properties of modified PET resin polymer mortar composite // Innovative Infrastructure Solutions. -2025. -Vol.10(3). -P.1–12. DOI 10.1007/s41062-025-01922-1.

16. Oral I., Özmeral N., Ahmetli G., Guzel H. Elastic and acoustic properties determination of epoxy/polystyrene/nanoclay/red mud waste hybrid composites by ultrasonic method // Polymer Composites. -2025. -Vol.46(1). - P.930-948. DOI 10.1002/pc.29224.

17. Keskisaari A., Butylina S., Kärki T. Use of construction and demolition wastes as mineral fillers in hybrid wood–polymer composites // Journal of Applied Polymer Science. -2016. -Vol.133(19). DOI 10.1002/app.43412,

18. Buaphuen P., Makcharoen W., Vittayakorn W. The enhancement of polymer composite coating by using a waste glass powder as alternative reinforcement // Ferroelectrics. -2022. -Vol.601(1). -P.151-163. DOI 10.1080/00150193.2022.2130771.

19. Bal B.C., Narlioglu N. Effect of waste glass reinforcements particle size on some properties of HDPE-based composites // Tribology and Materials. -2025. -Vol.4(1). -P.29-37. DOI 10.46793/tribomat.2025.001.

20. Abdulhameed J.I., Ali A.H., Kara İ.H., Mahan H.M., Konovalov S.V., Al-Nedawi N.M. Preparing eco-friendly composite from end-life tires and epoxy resin and examining its mechanical, and acoustic insulation properties // International Journal of Nanoelectronics and Materials. -2024. -Vol.17(1). -P.1-5. DOI 10.58915/ijneam.v17i1.514.

21. Shafqat A.R., Hussain M., Nawab Y., Ashraf M., Ahmad S., Batool G. Circularity in materials: a review on polymer composites made from agriculture and textile waste // International Journal of Polymer Science. -2023. -Vol.2023(1):5872605. DOI 10.1155/2023/5872605.

22. Wang X., Fu C., Feng Z., Huo H., Yin X., Gao G., et al. Flyash/polymer composite electrolyte with internal binding interaction enables highly-stable extrinsic-interfaces of all-solid-state lithium batteries // Chemical Engineering Journal. -2022. -Vol.428: 131041. DOI 10.1016/j.cej.2021.131041.

23. Gerasimova N.P. Ustanovka dlja intensifikacii processa zatverdevanija betona s ispol' zovaniem zoly unosa TJeC // Vestnik IrGTU. -2016. -№ 7 (114). –S.126-132. DOI 10.21285/1814-3520-2016-7-126-132. [in Russian]

24. Flores-Campos R., Deaquino-Lara R., Rodríguez-Reyes M., Martínez-Sánchez R., Estrada-Ruiz R.H. The use of nonmetallic fraction particles with the double purpose of increasing the mechanical properties of low-density polyethylene composite and reducing the pollution associated with the recycling of metals from e-waste // Recycling. -2024. -Vol.9(4): 56. DOI 10.3390/recycling9040056.

25. Kuznecova T.V. V Altajskom krae ispol' zujut zolu Barnaul' skoj TJeC dlja remonta dorog// Rossijskaja gazeta. -2025. - JeL № FS 77 -50379. [in Russian]

26. Chaturvedi A.K., Gupta M.K., Pappu A. The role of carbon nanotubes on flexural strength and dielectric properties of water sustainable fly ash polymer nanocomposites // Physica B: Condensed Matter. -2021.-Vol. 620: 413283. DOI 10.1016/j.physb.2021.413283.

27. Mojapelo K.S., Kupolati W.K., Burger E.A., Ndambuki J.M., Snyman J., Sadiku E.R. Recent progress in preparation, improvement and applications of green polymer composites // Biopolymers. -2025. -Vol.116(6): e70059. DOI 10.1002/bip.70059.

Сведения об авторах

Аманғалиева А.Е. - магистрант, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан, e-mail: Ashlen002@gmail.com;

Орынбасар Р.О. - кандидат химических наук, доцент, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан, e-mail: raihan_06_79@mail.ru;

Тастанова Л.К. - кандидат химических наук, профессор Heriot Watt Aktobe Campus, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан, e-mail: lyazzatt@mail.ru;

Жакупова Г.Ж. - преподаватель, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан, e-mail: gulmira.zhakupova80@bk.ru;

Жумабекова А.К. - кандидат химических наук, доцент, Казахский университет технологии и бизнеса им.К.Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail:,zhumabekova_ak@mail.ru.

Information about the authors

Amangalieva A.Y. - Master' s student, K.Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan, e-mail: Ashlen002@gmail.com;

Orynbasar R.O. - Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, K.Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan, e-mail: raihan_06_79@mail.ru;

Tastanova L.K. - Candidate of Chemical Sciences, Professor of Heriot Watt Aktobe Campus, K.Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan, e-mail: lyazzatt@mail.ru;

Zhakupova G.Z. - Lecturer K.Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan, e-mail: gulmira.zhakupova80@bk.ru;

Zhumabekova A.K. - Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhumabekova_ak@mail.ru.

IRSTI 61.67.81 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1449**

PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF GEOCOMPOSITE BASED ON LOW-PRESSURE POLYETHYLENE AND GEOTEXTILE DURING LONG-TERM OPERATION

[1]N.V. Seraya, [2]V.V. Litvinov, [1]G.K. Daumova✉, [1]D.E. Sovetkhanov, [3]M. Rutkowska-Gorczyca, [1]M.M. Baimurzina

[1]D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
[2]Proektno-ekologicheskoe bjuro LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
[3]Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland

✉ *Correspondent-author: gulzhan.daumova@mail.ru*

The paper presents the results of experimental studies of the physico-mechanical properties of geocomposite used as a covering material for winter blocks of TMF dumps of the Kounrad mine. The changes in the basic strength and deformation characteristics of the material depending on the service life (1 month, 2 years, 3 years) have been studied. The tests were carried out according to GOST standards with the determination of surface density, tensile and tear strength, elongation, yield strength, resistance to aggressive media and repeated freezing and thawing. The results showed that with increasing service life, there is an increase in surface density (from 445 to 604 g/m^2) and tensile strength (up to 9.5 kN/m), while reducing elongation. Geocomposite demonstrates high resistance to aggressive environments (up to 96%) and frost resistance, which confirms its durability and suitability for long-term use under conditions of variable climatic loads.

Keywords: geocomposite, low-pressure polyethylene, geotextile, physical and mechanical properties, strength, deformability, frost resistance, resistance to aggressive environments, operation, durability.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ГЕОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ И ГЕОТЕКСТИЛЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

[1]Н.В. Серая, [2]В.В. Литвинов, [1]Г.К. Даумова✉, [1]Д.Е. Советханов, [3]M. Rutkowska-Gorczyca, [1]М.М. Баймурзина

[1]Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан,
[2]ТОО «Проектно-экологическое бюро», Усть-Каменогорск, Казахстан,
[3]Wrocław University of Science and Technology, Вроцлав, Польша,
e-mail: gulzhan.daumova@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств геокомпозита, применяемого в качестве укрывного материала зимних блоков отвалов ТМО Коунрадского рудника. Изучены изменения основных прочностных и деформационных характеристик материала в зависимости от срока эксплуатации (1 месяц, 2 года, 3 года). Испытания проводились по стандартам ГОСТ с определением показателей поверхностной плотности, прочности при растяжении и разрыве, относительного удлинения, предела текучести, устойчивости к агрессивным средам и многократному замораживанию-оттаиванию. Результаты показали, что с увеличением срока эксплуатации наблюдается рост поверхностной плотности (с 445 до 604 г/м^2) и прочности при растяжении (до 9,5 кН/м), при одновременном снижении относительного удлинения. Геокомпозит демонстрирует высокую устойчивость к агрессивным средам (до 96 %) и морозостойкость, что подтверждает его долговечность и пригодность для длительного использования в условиях переменных климатических нагрузок.

Ключевые слова: геокомпозит, полиэтилен низкого давления, геотекстиль, физико-механические свойства, прочность, деформативность, морозостойкость, устойчивость к агрессивным средам, эксплуатация, долговечность.

ҰЗАҚ МЕРЗІМДІ ПАЙДАЛАНУ КЕЗІНДЕ ТӨМЕН ҚЫСЫМДЫ ПОЛИЭТИЛЕН ЖӘНЕ ГЕОТЕКСТИЛЬ НЕГІЗІНДЕГІ ГЕОКОМПОЗИТТІҢ ФИЗИКАЛЫҚ-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ МЕН БЕРІКТІГІ

[1]Н.В. Серая, [2]В.В. Литвинов, [1]Г.К. Даумова✉, [1]Д.Е. Советханов, [3]M. Rutkowska-Gorczyca, [1]М.М. Баймурзина

[1]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан,
[2]"Проектно-экологическое бюро" ЖШС, Өскемен, Қазақстан,
[3]Wrocław University of Science and Technology, Вроцлав, Польша,
e-mail: gulzhan.daumova@mail.ru

Жұмыста Қоңырат кенішінің ТМО үйінділерінің қысқы блоктарының жабын материалы ретінде қолданылатын геокомпозиттің физика-механикалық қасиеттерін эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген. Пайдалану мерзіміне (1 ай, 2 жыл, 3 жыл) байланысты материалдың негізгі беріктігі мен деформациялық сипаттамаларының өзгеруі зерттелді. Сынақтар беттің тығыздығы, созылу және үзілу беріктігі, салыстырмалы ұзарту, аққыштық шегі, агрессивті ортаға төзімділік және бірнеше рет мұздату-еріту көрсеткіштерін анықтай отырып, МЕСТ стандарттары бойынша жүргізілді. Нәтижелер пайдалану мерзімінің ұлғаюымен салыстырмалы ұзарудың бір мезгілде төмендеуімен беттің тығыздығының (445-тен 604 г/м^2-ге дейін) және созылу кезіндегі беріктіктің (9,5 кН/м дейін) өсуі байқалатынын көрсетті. Геокомпозит агрессивті ортаға жоғары төзімділікті (96% дейін) және аязға төзімділікті көрсетеді, бұл оның беріктігі мен өзгермелі климаттық жүктемелер жағдайында ұзақ мерзімді пайдалануға жарамдылығын растайды.

Түйін сөздер: геокомпозит, төмен қысымды полиэтилен, геотекстиль, физикалық-механикалық қасиеттер, беріктік, деформация, аязға төзімділік, агрессивті ортаға төзімділік, эксплуатация, ұзақ мерзімді пайдалану.

Introduction. Modern mining technologies are increasingly introducing geosynthetic materials to solve the problems of engineering protection and stabilization of landfills, tailings dumps and other man-made structures. Of particular importance in this context are geocomposites - multilayer materials that combine the functions of sealing, reinforcement, thermal insulation and protection against erosion processes [1-3]. Due to the combination of polymer and textile components, geocomposites provide high performance properties and durability with a relatively small weight.

One of the most common types of such materials is geocomposite based on low-pressure polyethylene (LPP) and non-woven geotextiles. This type of geomaterial is actively used as a covering and heat-protective coating in the conservation of winter blocks of landfills at mining enterprises. However, during long-term operation, under the influence of temperature fluctuations, freeze-thaw cycles, solar radiation and mechanical loads, physico-chemical and morphological changes occur in the polymer structure, affecting its strength and deformability [4, 5].

Authors [6, 7] showed that over time, the main physical and mechanical parameters of geosynthetics, such as tensile strength, yield strength and elongation, change depending on the degree of aging of the material. Polyethylene and polypropylene components are characterized by a gradual increase in stiffness and density while decreasing plasticity. This is due to the processes of relaxation of internal stresses, accumulation of microdefects and compaction of the material structure.

Special attention is paid to the behavior of geosynthetics when exposed to aggressive chemical environments and freeze-thaw cycles, since these factors determine their service life in real-world operating conditions [8,9]. It is known that for geocomposites used in mining enterprises, high frost resistance and chemical inertia are key parameters of durability.

Despite a significant number of studies devoted

to microstructural changes in geosynthetics, the relationship between density, strength characteristics and deformation properties of materials during long-term operations remains insufficiently studied. This is especially true for geocomposites used as thermal protective coatings for landfills in a sharply continental climate.

The purpose of this work is an experimental study of the physico-mechanical properties of a LPP-based geocomposite and geotextile used to shelter winter blocks of TMF dumps at the Kounrad mine, and an assessment of changes in its strength and deformation characteristics depending on the service life.

Materials and methods. *The object of research.* The object of the study was a geocomposite based on low-pressure polyethylene (LPP) and non-woven geotextile, used as a heat-protective coating for winter blocks of landfills of technogenic mineral formations (TMF) of the Kounrad mine. The material is a two-layer structure that combines the moisture resistance of the polymer layer and the mechanical strength of the textile fabric.

Geocomposite samples that had been in use for various periods of time were selected for testing:

- 1 month - shelter 2022 (block 26, dump 16);

- 2 years - shelter in 2021 (block 20, dump 16);

- 3 years - shelter in 2020 (block 3, dump 16).

This approach made it possible to evaluate the effect of the duration of operation on the physical and mechanical properties of the material.

Test procedure. The tests of the physical and mechanical properties of the geocomposite were carried out in accordance with the requirements of the current national standards - GOST R 50277, 50300-92, 56586, 11262-2017, 55035-2012, 55032-2012 [10-15].

The following parameters were determined for each sample:

- surface density, g/m2 (GOST R 50277) [10];

- tensile strength in the longitudinal and transverse directions, kN/m (GOST R 50300-92) [11];

- elongation at maximum load, % (GOST R 50300-92) [11];

- tensile strength and elongation at break, kN/m and % (GOST R 56586 [12], GOST 11262-2017) [13];

- yield strength and elongation at yield strength (GOST R 56586 [12], GOST 11262-2017) [13];

- resistance to aggressive environments (GOST R 55035-2012) [14];

- resistance to repeated freezing and thawing — frost resistance (GOST R 55032-2012) [15].

Tensile tests were carried out on a universal testing machine at a constant rate of deformation, with maximum load and elongation fixed until the sample collapses. Each test was performed in three parallel repeats, and the results were averaged with a standard deviation.

To determine chemical resistance, the samples were exposed to acidic (pH ≈ 2) and alkaline (pH ≈ 12) media at a temperature of (60 ± 1) °C for 72 hours. Upon completion of the tests, the materials were rinsed with running water, rinsed with distilled water and dried for at least 24 hours at room temperature. Next, the residual tensile strength was determined. The degree of resistance to aggressive media was assessed by the ratio of the strength of the treated samples to the strength of control samples that were not exposed to reagents.

The assessment of resistance to multiple cycles of freezing and thawing was carried out by comparing the mechanical characteristics of control samples and samples that had undergone 10-20 cycles of freezing (at -20 °C) and thawing (at +20 °C) in an aqueous environment. At the end of the cycle, the samples were subjected to tensile tests. Frost resistance was expressed as a percentage of strength retention after cyclic exposure.

The measurement results were processed statistically, with the calculation of average values, standard deviations and the construction of comparative dependencies between the service life and changes in physical and mechanical characteristics. Grapho-analytical methods were used to interpret relationships.

A correlation analysis was performed to

identify the relationships between the physical and mechanical characteristics of the geocomposite. The method is based on the calculation of Pearson paired linear correlation coefficients, which allow quantifying the degree and direction of the relationship between two random variables. The correlation coefficient r_{xy} was calculated using the formula (1):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

where x_i, y_i are the values of the parameters being compared;

$\bar{x}, \bar{y}$ - their average values;

n is the number of observations.

The values of the r_{xy} coefficient range from -1 to +1. Positive values correspond to a direct correlation (an increase in one parameter is accompanied by an increase in the other), negative values correspond to an inverse relationship, and values close to zero indicate the absence of a relationship. The average values of the parameters obtained from the results of three series of tests of geocomposite samples with different service life (1 month, 2 years, 3 years) were used for the analysis.

Results and discussion. The results of experimental studies of the physico-mechanical properties of the geocomposite are presented in Table 1. Analysis of the data obtained made it possible to establish patterns of changes in the strength and deformation characteristics of the material depending on its service life as a heat-protective coating for winter blocks of landfills.

One of the key indicators of the state of a geosynthetic material is its surface density, which determines the specific gravity of the web and reflects the degree of its uniformity. According to the experimental data obtained (Table 1), the surface density of the geocomposite increases from 445 g/m^2 (sample 2022, 1 month of operation) to 604 g/m^2 (sample 2020, 3 years of operation). The increase in this indicator is associated with the penetration of mineral and organic pollutants into the structure of the material both from the outside (surface infiltration) and from the inside — from the side of contact with the soil. An increase in density leads to an increase in the strength, rigidity and wear resistance of the material, but it is accompanied by a decrease in breathability and stretchability. This indicates a gradual consolidation of the geocomposite structure during operation, which was also noted by other researchers [2, 16].

Tensile strength is the main characteristic determining the bearing capacity of geotextile and polymer components. According to the test results, the strength of the geocomposite increases longitudinally from 8.6 to 9.5 kN/m, and in the transverse direction from 6.3 to 7.7 kN/m. The increase in strength indicators confirms the effect of ”compaction” of the material during long-term operation, which is associated with a decrease in fiber mobility and increased adhesion between the layers of LPP and geotextile. At the same time, an increase in strength is accompanied by an increase in stiffness, which is consistent with the literature data on the behavior of thermally bonded geosynthetics after cycles of thermo-mechanical aging [17].

Elongation characterizes the ductility and deformability of a material. As the service life of the geocomposite increases, the elongation index decreases from 66 to 44% in the longitudinal direction and from 67 to 43% in the transverse direction (Table 1). The decrease in plasticity is explained by an increase in the density and rigidity of the material due to the compaction of the structure and partial aging of the polymer. This is a typical pattern for polyethylene and polypropylene geosynthetics exposed to atmospheric aging [18].

The tensile strength increases from 1.74 to 2.49 kN/m in the longitudinal direction and from 1.85 to 2.95 kN/m in the transverse direction (Table 1). This indicates that geocomposite retains high strength properties even after prolonged exposure to natural factors. It is likely that partial hardening of the material occurs due to structural ”self-sealing” and stress redistribution in the fibers during operation. A similar effect is noted in studies on the durability of geosynthetic materials in the climatic conditions of Central Asia [19].

Table 1 - Basic physical and mechanical characteristics of geocomposite samples

№	Parameter	Geocomposite sample		
		26th block, 16th dump, 2022 y (1 month)	20th block, 16th dump, 2021 y, (2 years)	3rd block, 16th dump, 2020 y (3 years old)
1	Surface density, g/m^2 (according to GOST R 50277)	445±16	523±41	604±77
2	Tensile strength (longitudinal direction), kN/m (according to GOST R 50300-92) [11]	8,6±0,5	8,9±0,3	9,5±0,8
3	Tensile strength (transverse direction), kN/m (according to GOST R 50300-92) [11]	6,3±0,4	7,6±0,4	7,7±0,9
4	Elongation at maximum load (in the longitudinal direction), % (according to GOST R 50300-92) [11]	66±4	36±2	44±2
5	Elongation at maximum load (in the transverse direction), % (according to GOST R 50300-92) [11]	67±5	53±2	43±3
6	Tensile strength (in the longitudinal direction), kN/m (according to GOST R 56586 [12], GOST 11262-2017 [13])	1,74±0,13	2,46±0,59	2,49±0,29
7	Tensile strength (in the transverse direction), kN/m (according to GOST R 56586 [12], GOST 11262-2017 [13])	1,85±0,17	2,87±0,59	2,95±0,25
8	Elongation at break (in the longitudinal direction), % (according to GOST R 56586 [12], GOST 11262-2017 [13])	234±34	156±30	93±6
9	Elongation at break (in the transverse direction), % (according to GOST R 56586 [12], GOST 11262-2017 [13])	94±23	177±25	145±20
10	Yield strength (in the longitudinal direction), kN/m (according to GOST R 56586 [12], GOST 11262-2017 [13])	2,13±0,21	3,62±0,30	2,69±0,29
11	Yield strength (in the transverse direction), kN/m (according to GOST R 56586 [12], GOST 11262-2017 [13])	2,23±0,15	3,64±0,31	3,14±0,21
12	Elongation at yield strength (in the longitudinal direction), % (according to GOST R 56586 [12], GOST 11262-2017[13])	11±1	15±1	16±2
13	Elongation at yield strength (in the transverse direction), % (according to GOST R 56586 [12], GOST 11262-2017 [13])	12±1	13±1	12±1
14	Resistance to aggressive environments, % (according to GOST R 55035 [14])	92,1	93,4	94,9
15	Resistance to repeated freezing and thawing (frost resistance), % (according to GOST R 55032-2012 [15])	92,2	95,5	93,1

The change in elongation at break is multidirectional. In the longitudinal direction, the elongation decreases from 234 to 93%, reflecting a decrease in the ductility and elastic properties of the material; in the transverse direction, on the contrary, it increases from 94 to 145%. This anisotropy is due to the design features of the geotextile web: the longitudinal direction is more durable but less elastic, while the transverse direction retains the ability to deform under load, compensating for tensile forces.

Yield strength indicators reflect the ability of a material to maintain its shape under prolonged loads. In the longitudinal direction, the yield

strength increases from 2.13 to 2.69 kN/m, in the transverse direction - from 2.23 to 3.14 kN/m. An increase in values indicates the formation of a more stable polymer structure showing signs of self-hardening. This is consistent with the known relaxation and creep effects for polyethylene described in the papers [20, 21].

The elongation at yield strength increases longitudinally from 11 to 16% and remains almost unchanged in the transverse direction (12-13%). This data confirm that the material is able to partially retain its deformability during the transition to the stage of plastic flow, which is important for assessing its operational reliability.

According to the test results, the geocomposite demonstrates high chemical resistance: resistance to acidic and alkaline environments is 92-96%. After three years of operation, the material even increases its stability, which is explained by the compaction of the structure and a decrease in the permeability of fibers to reagents. These results confirm the chemical inertia of LPP and polypropylene fibers [22].

All the samples studied showed high resistance to repeated cycles of freezing and thawing - the strength retention was 92-95% (Table 1). In some cases, even a slight increase in strength was observed, which is associated with the effect of ”shrinkage” and compaction of the structure during freezing. These results confirm the possibility of long-term use of geocomposite in a sharply continental climate without loss of operational properties.

A comparison of the data obtained shows that with increasing service life, there is a tendency to increase the strength characteristics and decrease the deformability of the material. This is due to the compaction of the structure and the redistribution of stresses in the geocomposite layers. At the same time, the material retains high chemical resistance and frost resistance, which indicates its durability and resistance to climatic influences.

An analysis of the correlations between the physico-mechanical characteristics of the geocomposite showed (Table 2) that most of the strength parameters, including surface density, tensile and tear strength in the longitudinal and transverse directions, have a strong positive correlation with the age of the sample (+0.95...+0.99). This indicates a tendency for the strength and density of the material to increase over time. At the same time, elongation at maximum load and at break in the longitudinal direction shows a strong negative correlation with age (-0.95...-0.99), which indicates a decrease in plasticity and increased rigidity of the material. As the service life increases, the geocomposite becomes more durable but less deformable, which is associated with aging processes and partial degradation of the polymer component. Some parameters, such as elongation at the yield point in the transverse direction and frost resistance, practically do not correlate with age, which reflects their stability regardless of the operating time. Positive correlations between strength characteristics and resistance to aggressive environments (+0.95...+0.96) confirm the durability of the material under chemically aggressive influences.

Thus, the conducted studies have confirmed that the LPP and geotextile-based geocomposite has a set of operational properties that ensure its effective use as a covering material for winter landfill blocks during long-term operations.

Conclusions. In the course of the experimental studies, the physicomechanical properties of a geocomposite based on low-pressure polyethylene (LPP) and non-woven geotextile used as a heat-protective coating for winter blocks of TMF dumps of the Kounrad mine were studied. Based on the analysis of the data obtained, patterns of changes in the strength and deformation characteristics of the material have been established depending on the service life. The results obtained made it possible to evaluate the influence of climatic and operational factors on the durability and stability of the geocomposite properties:

Table 2 - Matrix of correlation coefficients between the physical and mechanical characteristics of the geocomposite

№	Indicator	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Surface density, g/m^2	1	0.98	0.97	-0.97	-0.95	0.99	0.99	-0.99	0.50	0.36	0.85	0.97	0.00	0.96	0.38
2	Tensile strength (longitudinal direction), kN/m	0.98	1	0.99	-0.97	-0.93	0.96	0.97	-0.96	0.50	0.60	0.90	0.95	0.00	0.95	0.40
3	Tensile strength (transverse direction), kN/m	0.97	0.99	1	-0.94	-0.91	0.95	0.97	-0.94	0.45	0.55	0.89	0.93	0.00	0.93	0.35
4	Elongation at maximum load (in the longitudinal direction), %	-0.97	-0.97	-0.94	1	0.92	-0.95	-0.93	0.99	-0.50	-0.36	-0.85	-0.97	0.00	-0.95	-0.38
5	Elongation at maximum load (in the transverse direction), %	-0.95	-0.93	-0.91	0.92	1	-0.92	-0.91	0.92	-0.45	-0.30	-0.75	-0.90	0.00	-0.90	-0.32
6	Tensile strength (in the longitudinal direction), kN/m	0.99	0.96	0.95	-0.95	-0.92	1	0.99	-0.98	0.50	0.40	0.88	0.95	0.00	0.96	0.36
7	Tensile strength (in the transverse direction), kN/m	0.99	0.97	0.97	-0.93	-0.91	0.99	1	-0.96	0.48	0.38	0.87	0.94	0.00	0.95	0.35
8	Elongation at break (in the longitudinal direction), %	-0.99	-0.96	-0.94	0.99	0.92	-0.98	-0.96	1	-0.50	-0.35	-0.85	-0.96	0.00	-0.95	-0.38
9	Elongation at break (in the transverse direction), %	0.50	0.50	0.45	-0.50	-0.45	0.50	0.48	-0.50	1	0.10	0.20	0.50	0.00	0.45	0.12
10	Yield strength (in the longitudinal direction), kN/m	0.36	0.60	0.55	-0.36	-0.30	0.40	0.38	-0.35	0.10	1	0.75	0.70	0.00	0.80	0.30
11	Yield strength (in the transverse direction), kN/m	0.85	0.90	0.89	-0.85	-0.75	0.88	0.87	-0.85	0.20	0.75	1	0.80	0.00	0.90	0.35
12	Elongation at yield strength (in the longitudinal direction), %	0.97	0.95	0.93	-0.97	-0.90	0.95	0.94	-0.96	0.50	0.70	0.80	1	0.00	0.95	0.38
13	Elongation at yield strength (in the transverse direction), %	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
14	Resistance to aggressive environments, %	0.96	0.95	0.93	-0.95	-0.90	0.96	0.95	-0.95	0.45	0.80	0.90	0.95	0.00	1	0.35
15	Resistance to repeated freezing and thawing (frost resistance), %	0.38	0.40	0.35	-0.38	-0.32	0.36	0.35	-0.38	0.12	0.30	0.35	0.38	0.00	0.35	1

1) During the operation of the geocomposite, an increase in surface density is observed from 445 to 604 g/m^2, which is associated with the penetration of mineral and organic inclusions into the structure of the material. An increase in density leads to an increase in the strength and rigidity of the web but reduces its ductility and vapor permeability.

2) The tensile strength increases both longitudinally and transversely, reaching 9.5 and 7.7 kN/m, respectively, which indicates a stabilization of the structure and increased adhesion between LPP and geotextile layers during operation.

3) The elongation at maximum load decreases (in the longitudinal direction from 66 to 44%, in the transverse direction from 67 to 43%), which indicates a decrease in the plasticity of the material due to its compaction and polymer aging.

4) The tensile strength increases with operation (longitudinally up to 2.49 kN/m, transversely up to 2.95 kN/m), confirming the high strength of the geocomposite and its ability to maintain the integrity of the structure under prolonged loads.

5) During operation, anisotropy of deformation properties is manifested: the longitudinal direction is characterized by greater strength, but less elasticity, while the transverse direction demonstrates a higher deformability, which contributes to an even distribution of loads.

6) The yield strength in both directions increases (up to 2.69–3.14 kN/m), which indicates the formation of a stable state of the material capable of withstanding prolonged static loads without destruction.

7) Geocomposite retains high resistance to aggressive environments — up to 96% after three years of operation, which confirms the chemical inertia of polyethylene and geotextile fibers, as well as high frost resistance (92-95%) during multiple cycles of freezing and thawing.

8) Correlation analysis made it possible to quantify the patterns identified during mechanical tests.: The increase in the density and strength of the material is accompanied by a decrease in its deformability, which indicates the strengthening of the geotextile structure.

In general, geocomposite has demonstrated complex durability and stability of properties during long-term operation in a sharply continental climate. The material retains its protective functions and mechanical strength, which allows it to be recommended for long-term use in shelter and protection systems for mining facilities.

Литература

1. Кутепова Н.А., Кутепов Ю.И., Васильева А. Д., Кутепов Ю.Ю. Влияние на устойчивость отвалов гидроизоляции основания с применением геосинтетических материалов (геомембран)// ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. -2025. -№ 1. -С.47-65. DOI 10.25018/0236_1493_2025_1_0_47.

2. Wu H., Yao C., Li C., Miao M., Zhong Y., Lu Y., Liu T. Review of application and innovation of geotextiles in geotechnical engineering // Materials. -2020. -Vol.13(7):1774. DOI 10.3390/ma13071774.

3. Al-Barqawi M., Aqel R., Wayne M., Titi H., Elhajjar R. Polymer Geogrids: A Review of Material, Design and Structure Relationships // Materials. -2021. -Vol.14(16):4745. DOI 10.3390/ma14164745.

4. Carneiro J.R., Lopes M.d. L. Weathering of a nonwoven polypropylene geotextile: Field vs. laboratory exposure // Materials. -2022. -Vol. 15(22):8216. DOI 10.3390/ma15228216.

5. Korolev A., Mishnev M., Zherebtsov D., Vatin N. I., Karelina, M. Polymers under Load and Heating Deformability: Modelling and Predicting // Polymers. -2021. -Vol.13(3). -P.428. DOI 10.3390/polym13030428.

6. Scholz P., Falkenhagen J., Wachtendorf V., Brüll R., Simon F.-G. Investigation on the Durability of a Polypropylene Geotextile under Artificial Aging Scenarios // Sustainability. -2024. - Vol.16(9): 3559.

DOI 10.3390/su16093559.

7. Markiewicz A., Koda E., Kiraga M., Wrzesiński G., Kozanka K., Naliwajko M., Vaverková M.D. Polymeric Products in Erosion Control Applications: A Review // Polymers. -2024. - Vol.16(17): 2490. DOI 10.3390/polym16172490.

8. Chubarenko B., Domnin D., Simon F-G., Scholz P., Leitsin V., Tovpinets A., Karmanov K., Esiukova E. Change over Time in the Mechanical Properties of Geosynthetics Used in Coastal Protection in the South-Eastern Baltic // Journal of Marine Science and Engineering. - 2023. - Vol.11(1). -P.113. DOI 10.3390/jmse11010113.

9. Vicuña L., Jaramillo-Fierro X., Cuenca P.E., Godoy-Paucar B., Inga-Lafebre J.D., Chavez Torres J.L., García J.F., Guaya D., Febres J.D. Evaluation of the Effectiveness of Geogrids Manufactured from Recycled Plastics for Slope Stabilization - A Case Study // Polymers. -2024. - Vol.16(8): 1151. DOI 10.3390/polym16081151.

10. ГОСТ Р 56586-2015. Геомембраны гидроизоляционны е полиэтиленовы е рулонные. Технические условия/ Стандартинформ. - 2016. - 12 с.

11. ГОСТ Р 50277-92 (ИСО 9864-90). Материалы геотекстильные метод определения поверхностной плотности / Госстандарт России. - 1992. - 4 с.

12. ГОСТ Р 50300-92. Резцы токарные со сменными режущими пластинам и из сверхтвердых материалов. Технические условия/ Госстандарт России. - 1994. - 7 с.

13. ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2 012). Пластмассы. Метод испытания на растяжение/ Стандартинформ. - 2018. - 24 с.

14. ГОСТ Р 55035-2012. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к агрессивным средам/ Стандартинформ - 2013. - 12 с.

15. ГОСТ Р 55032-2012. Национальный стандарт российской федерации. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к многократному замораживанию и оттаиванию/ Стандартинформ .- 2013. - 12 с.

16. Carneiro J.R., Gomes M., Vieira C.S. Inclined Plane Shear Behaviour of a Recycled Construction and Demolition Material–Geocomposite Interface // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. - 2023. - Vol.9: 88. DOI 10.1007/s40891-023-00507-1.

17. Carneiro J.R., Almeida F., Carvalho F., Lopes M.d.L. Tensile and Tearing Properties of a Geocomposite Mechanically Damaged by Repeated Loading and Abrasion // Materials. -2023. - Vol.16(21):7047. DOI 10.3390/ma16217047.

18. Ferreira F.B., Vieira C.S., Lopes M.L. Pullout Behavior of Different Geosynthetics - Influence of Soil Density and Moisture Content // Frontiers in Built Environment. -2020. - Vol.6: 12. -P.1-13. DOI 10.3389/fbuil.2020.00012.

19. Lesov K., Uralov A., Kenjaliyev M., Ergashev U., Huaiping F. The importance of using geosynthetic materials in ensuring anti-erosion stability of railway embankments // Vibroengineering Procedia. -2025. -Vol.60. -P.318–324. DOI 10.21595/vp.2025.25326.

20. Kim H., Choi J. Influence of crystalline structure on creep resistance capability in semi-crystalline Polymers: A coarse-grained molecular dynamics study // International Journal of Fatigue. -2024. - Vol.188: 108517. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2024.108517.

21. Yan W., Gao S., Feng Y., Liu B. Toward excellent strength, modulus, and high-temperature creep

resistance for wide molecular weight distribution polyethylene fiber by melt-spinning // European Polymer Journal. -2025. -Vol.236: 114132. DOI 10.1016/j.eurpolymj.2025.114132.

22. Lomovskoy V. A., Shatokhina S.A. Relaxation Phenomena in Low-Density and High-Density Polyethylene // Polymers. -2024. - Vol.16(24): 3510. DOI 10.3390/polym16243510.

References

1. Kutepova N.A., Kutepov Ju.I., Vasil’ eva A. D., Kutepov Ju.Ju. Vlijanie na ustojchivost’ otvalov gidroizoljacii osnovanija s primeneniem geosinteticheskih materialov (geomembran)// GIAB. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten’. -2025. -№ 1. -C.47-65. DOI 10.25018/0236_1493_2025_1_0_47. [in Russian]

2. Wu H., Yao C., Li C., Miao M., Zhong Y., Lu Y., Liu T. Review of application and innovation of geotextiles in geotechnical engineering // Materials. -2020. -Vol.13(7):1774. DOI 10.3390/ma13071774.

3. Al-Barqawi M., Aqel R., Wayne M., Titi H., Elhajjar R. Polymer Geogrids: A Review of Material, Design and Structure Relationships // Materials. -2021. -Vol.14(16):4745. DOI 10.3390/ma14164745.

4. Carneiro J.R., Lopes M.d. L. Weathering of a nonwoven polypropylene geotextile: Field vs. laboratory exposure // Materials. -2022. -Vol. 15(22):8216. DOI 10.3390/ma15228216.

5. Korolev A., Mishnev M., Zherebtsov D., Vatin N. I., Karelina, M. Polymers under Load and Heating Deformability: Modelling and Predicting // Polymers. -2021. -Vol.13(3). -P.428. DOI 10.3390/polym13030428.

6. cholz P., Falkenhagen J., Wachtendorf V., Brüll R., Simon F.-G. Investigation on the Durability of a Polypropylene Geotextile under Artificial Aging Scenarios // Sustainability. -2024. - Vol.16(9): 3559. DOI 10.3390/su16093559.

7. Markiewicz A., Koda E., Kiraga M., Wrzesiński G., Kozanka K., Naliwajko M., Vaverková M.D. Polymeric Products in Erosion Control Applications: A Review // Polymers. -2024. - Vol.16(17): 2490. DOI 10.3390/polym16172490.

8. Chubarenko B., Domnin D., Simon F-G., Scholz P., Leitsin V., Tovpinets A., Karmanov K., Esiukova E. Change over Time in the Mechanical Properties of Geosynthetics Used in Coastal Protection in the South-Eastern Baltic // Journal of Marine Science and Engineering. - 2023. - Vol.11(1). -P.113. DOI 10.3390/jmse11010113.

9. Vicuña L., Jaramillo-Fierro X., Cuenca P.E., Godoy-Paucar B., Inga-Lafebre J.D., Chavez Torres J.L., García J.F., Guaya D., Febres J.D. Evaluation of the Effectiveness of Geogrids Manufactured from Recycled Plastics for Slope Stabilization - A Case Study // Polymers. -2024. - Vol.16(8): 1151. DOI 10.3390/polym16081151.

10. GOST R 56586-2015. Geomembrany gidroizoljacionny e polijetilenovy e rulonnye. Tehnicheskie uslovija/ Standartinform. - 2016. - 12 c. [in Russian]

11. GOST R 50277-92 (ISO 9864-90). Materialy geotekstil’ nye metod opredelenija poverhnostnoj plotnosti / Gosstandart Rossii. - 1992. - 4 c. [in Russian]

12. GOST R 50300-92. Rezcy tokarnye so smennymi rezhushhimi plastinam i iz sverhtverdyh materialov. Tehnicheskie uslovija/ Gosstandart Rossii. - 1994. - 7 c. [in Russian]

13. GOST 11262-2017 (ISO 527-2:2012). Plastmassy. Metod ispytanija na rastjazhenie/ Standartinform. - 2018. - 24 c. [in Russian]

14. GOST R 55035-2012. Dorogi avtomobil’ nye obshhego pol’ zovanija. Materialy geosinteticheskie

dlja dorozhnogo stroitel’ stva. Metod opredelenija ustojchivosti k agressivnym sredam/ Standartinform - 2013. - 12 c. [in Russian]

15. GOST R 55032-2012. Nacional’ nyj standart rossijskoj federacii. Dorogi avtomobil’ nye obshhego pol’ zovanija. Materialy geosinteticheskie dlja dorozhnogo stroitel’ stva. Metod opredelenija ustojchivosti k mnogokratnomu zamorazhivaniju i ottaivaniju/ Standartinform .- 2013. - 12 c. [in Russian]

16. Carneiro J.R., Gomes M., Vieira C.S. Inclined Plane Shear Behaviour of a Recycled Construction and Demolition Material–Geocomposite Interface // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. - 2023. - Vol.9: 88. DOI 10.1007/s40891-023-00507-1.

17. Carneiro J.R., Almeida F., Carvalho F., Lopes M.d.L. Tensile and Tearing Properties of a Geocomposite Mechanically Damaged by Repeated Loading and Abrasion // Materials. -2023. - Vol.16(21):7047. DOI 10.3390/ma16217047.

18. Ferreira F.B., Vieira C.S., Lopes M.L. Pullout Behavior of Different Geosynthetics - Influence of Soil Density and Moisture Content // Frontiers in Built Environment. -2020. - Vol.6: 12. -P.1-13. DOI 10.3389/fbuil.2020.00012.

19. Lesov K., Uralov A., Kenjaliyev M., Ergashev U., Huaiping F. The importance of using geosynthetic materials in ensuring anti-erosion stability of railway embankments // Vibroengineering Procedia. -2025. -Vol.60. -P.318–324. DOI 10.21595/vp.2025.25326.

20. Kim H., Choi J. Influence of crystalline structure on creep resistance capability in semi-crystalline Polymers: A coarse-grained molecular dynamics study // International Journal of Fatigue. -2024. - Vol.188: 108517. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2024.108517.

21. Yan W., Gao S., Feng Y., Liu B. Toward excellent strength, modulus, and high-temperature creep resistance for wide molecular weight distribution polyethylene fiber by melt-spinning // European Polymer Journal. -2025. -Vol.236: 114132. DOI 10.1016/j.eurpolymj.2025.114132.

22. Lomovskoy V. A., Shatokhina S.A. Relaxation Phenomena in Low-Density and High-Density Polyethylene // Polymers. -2024. - Vol.16(24): 3510. DOI 10.3390/polym16243510.

Information about the authors

Seraya N.V. - Candidate of Chemical Sciences, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: nseraya@mail.ru;

Litvinov V.V. - Deputy Director, Proektno-ekologicheskoe bjuro LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: litvinov_vadim@mail.ru;

Daumova G.K. - Candidate of Technical Sciences, Professor, D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: gulzhan.daumova@mail.ru;

Sovetkhanov D.E. - Master of Technical Sciences, Doctoral student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: sovetkhanovdauren5@gmail.com;

Rutkowska-Gorczyca M. - PhD, Professor, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland, e-mail: malgorzata.rutkowska-gorczyca@pwr.edu.pl;

Baimurzina M.M. - student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: may787585@gmail.com.

Сведения об авторах

Серая Н.В. - кандидат химических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: nseraya@mail.ru;

Литвинов В.В. - заместитель директора, ТОО «Проектно-экологическое бюро», Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: litvinov_vadim@mail.ru;

Даумова Г. К. – кандидат технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им.

Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: gulzhan.daumova@mail.ru;

Советханов Д.Е. – магистр технических наук, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: sovetkhanovdauren5@gmail.com;

Rutkowska-Gorczyca M.- PhD, профессор, Вроцлавский университет науки и технологии, Вроцлав, Польша, e-mail: malgorzata.rutkowska-gorczyca@pwr.edu.pl.;

Баймурзина М.М. - студент, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: may787585@gmail.com.

ГРНТИ 31.21.19 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1455**

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРАСТВОРИМОЙ ФОРМЫ 2-((2-ИЗОНИКОТИНОИЛГИДРАЗОНО)МЕТИЛ)БЕНЗОЙНОЙ КИСЛОТЫ В β-ОЛИГОСАХАРИДНОЙ КАПСУЛЕ

[1,2]А.Ж. Мендибаева, [1]С.Д. Фазылов✉, [2]С.К. Кабиева, [2]Р.К. Жаслан, [3]С.Б. Жаутикова, [4]А.П. Богоявленский, [1]О.А. Нуркенов

[1]Институт органического синтеза и углехимии РК, Караганда, Казахстан,
[2]Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан,
[3]Карагандинский медицинский университет, Караганда, Казахстан,
[4] Институт микробиологии и вирусологии, Алматы, Казахстан

✉ *Корреспондент-автор: faz8990@mail.ru*

В статье приведены результаты научных исследований по синтезу и разработке технологической схемы получения субстанции нового средства - водорастворимой формы 2-((2-изоникотиноилгидразоно)метил)бензойной кислоты в β-олигосахаридной капсуле, обладающий противовирусной активностью. Субстанция гинказона получена на основе химической модификации известного противотуберкулезного препарата изониазида (ГИНК) в условиях реакции с 2-формилбензойной кислотой. Структура субстрата и его клатратного комплекса устанавливалась современными физико-химическими методами ИК- (KBr), ЯМР ^{1}H, ^{13}C-спектроскопии (ДМСО-d_6 и $CDCl_3$). Водорастворимый комплекс включения гинказона получена путем инкапсулирования 2-((2-изоникотиноилгидразоно)- метил) бензойной кислоты с использованием крахмального β-олигосахарида из водно-спиртовой среды. Проведено молекулярное моделирование механизма образования клатратных комплексов включения субстрата. Противовирусная активность исследуемого вещества с целью расчёта его химико-терапевтического индекса оценивалась в диапазоне концентраций 0,0016-0,2%, что эквивалентно дозировкам 0,003–0,4 мг на один куриный эмбрион (в пересчёте 0,06-8 мг/кг массы). Вирусоингибирующая активность нового соединения в два раза выше, чем у тамифлю и ремантадина. Новое соединение и его водорастворимый комплекс характеризуются высоким химико-терапевтическим индексом, что создает перспективу для дальнейшего использования в фармакологических исследованиях.

Ключевые слова: гидразид изоникотиновой кислоты, β-олигосахарид, комплексообразование, субстанция, антивирусные средства, технологическая схема.

2-((2-ИЗОНИКОТИНОИЛГИДРАЗОНО)МЕТИЛ)БЕНЗОЙ ҚЫШҚЫЛЫНЫҢ β-ОЛИГОСАХАРИДПЕН ҚАПТАЛҒАН СУДА ЕРИТІН ТҮРІН АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

[1,2]Ә.Ж. Меңдібаева, [1]С.Д. Фазылов✉, [2]С.Қ. Қабиева, [2]Р.Қ. Жаслан, [3]С.Б. Жаутикова, [4]А.П. Богоявленский, [1]О.А. Нүркенов

[1]ҚР органикалық синтез және көмір химиясы институты, Қарағанды, Қазақстан,
[2]Қарағанды индустриалды университеті, Теміртау, Қазақстан,
[3]Қарағанды медициналық университеті, Қарағанды, Қазақстан,
[4]Микробиология және вирусология институты, Алматы, Қазақстан,
e-mail: faz8990@mail.ru

Бұл мақалада вирусқа қарсы белсенділік көрсететін жаңа субстанция - 2-((2-изоникотиноилгидразоно)метил)бензой қышқылының β-олигосахаридпен қапталған суда еритін түрін алу синтезі және технологиялық схеманы әзірлеу бойынша ғылыми зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Гинказон заты туберкулезге қарсы белгілі изониазид (ИНҚГ) препаратын 2-формилбензой қышқылымен химиялық модификациялау арқылы алынды. Субстраттың құрылымы және оның клатрат кешені ИҚ- (KBr), ^{1}H және ^{13}C ЯМР спектроскопиясы (DMSO-d_6 және $CDCl_3$) сияқты заманауи

физика-химиялық әдістерді қолдану арқылы анықталды. Гинказонның суда еритін кешені сулы-спиртті ортада крахмал β-олигосахаридін пайдаланып 2-((2-изоникотиноилгидразоно)метил) бензой қышқылын қаптау арқылы алынды. Субстраттың клатрат қосылу кешендерінің түзілу механизмін молекулалық модельдеу жүргізілді. Қосылыс үлгісінің вирусқа қарсы белсенділігі тауық эмбрионына 0,003-0,4 мг (0,06-8 мг/кг) дозада сәйкес келетін 0,0016%-дан 0,2%-ға дейінгі концентрациядағы химиялық-терапиялық индексті анықтау үшін зерттелді. Жаңа қосылыстың вирусқа қарсы белсенділігі Тамифлю мен римантадинге қарағанда екі есе жоғары. Жаңа қосылыс және оның суда еритін кешені жоғары химиялық-терапиялық индексімен сипатталады, бұл оны әрі қарай фармакологиялық зерттеулер үшін маңызды болып табылады.

Түйін сөздер: изоникотин қышқылының гидразиді, β-олигоқант, комплекс түзілу, гинказон, антивирустық қосылыстар, технологиялық схема.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF A WATER-SOLUBLE FORM OF 2-((2-ISONICOTINOYLHYDRAZONE)METHYL)BENZOIC ACID IN A β-OLIGOSACCHARIDE CAPSULE

[1,2]A.Zh. Mendibayeva, [1]S.D. Fazylov✉, [2]S.K. Kabiyeva, [2]R.K. Zhaslan, [3]S.B. Zhautikova, [4]A.P. Bogoyavlensky, [1]O.A. Nurkenov

[1]Institute of organic synthesis and coal chemistry of the Republic of Kazakhstan, Karaganda, Kazakhstan,
[2]Karaganda industrial university, Temirtau, Kazakhstan,
[3]Karaganda medical university, Karaganda, Kazakhstan,
[4]Institute of microbiology and virology, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: faz8990@mail.ru

The article presents the results of scientific research on the synthesis and development of a technological scheme for the production of a substance of the new compound a water-soluble form of 2-((2-isonicotinoylhydrazone) methyl)benzoic acid in a β-oligosaccharide capsule, which has antiviral activity. The gincazon substance was obtained on the basis of a chemical modification of the well-known anti-tuberculosis drug isoniazid (IAH) in reaction with 2-formylbenzoic acid. The structure of the substrate and its clathrate complex was determined by modern physicochemical methods of IR- (KBr), ^{1}H and ^{13}C NMR spectroscopy (DMSO-d_6 and $CDCl_3$). The water-soluble gincazon inclusion complex was obtained by encapsulation of 2-((2-isonicotinoylhydrazone) methyl)benzoic acid using starch β-oligosaccharide from an aqueous alcohol solution. Molecular modeling of the mechanism of formation of clathrate complexes of substrate inclusion has been carried out. The viral inhibitory activity of the compound sample for determining the chemical therapeutic index was studied at concentrations from 0.0016% to 0.2%, which corresponded to doses of 0.003-0.4 mg per chicken embryo (0.06-8 mg/kg). The virus-inhibiting activity of the new compound is twice as high as that of tamiflu and remantadine. The new compound and its water-soluble complex are characterized by a high chemical-therapeutic index, which creates prospects for further use in pharmacological research.

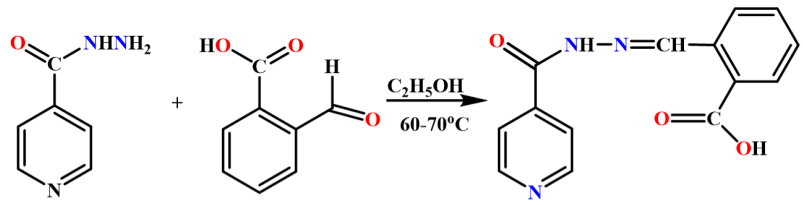
Keywords: isonicotinic acid hydrazide, β-oligosaccharide, antiviral agents, complex formation, gincazon, technological scheme.

Введение. Согласно данным ВОЗ, ежегодная смертность от различных форм респираторных заболеваний достигает порядка одного миллиона случаев. Многократное применение известных противовирусных препаратов сопровождается формированием резистентности вирусных штаммов к используемым лекарственным средствам, что существенно снижает эффективность терапии. Указанные обстоятельства обусловливают необходимость поиска новых подходов к решению данной проблемы, в том числе посредством разработки и внедрения новых фармакологически активных соединений [1-3]. Значительная часть лекарственных средств, применя-

емых в клинической практике для лечения заболеваний органов дыхания, содержит в своей структуре гидразидный фрагмент. Соединения данного класса являются достаточно хорошо изученными и находят широкое применение в различных областях науки, техники и медицины [4]. В научной литературе имеется большое количество научных работ, посвящённых изучению методов получения гидразидных производных, исследованию их строения и физико-химических свойств. Указанные соединения сохраняют актуальность как объекты дальнейших исследований и модификации. В связи с этим использование гидразида изоникотиновой кислоты, как исходного субстрата в поиске новых антивирусных средств вызывает большой интерес у химиков-синтетиков и фармакологов всего мира.

В химической практике применяются различные методы перевода нерастворимых органических субстратов в водорастворимое состояние с использованием вспомогательных компонентов, например, перевод в солевую форму (гидрохлориды) [5]. В настоящее время различные фармацевтические компании начали широко практиковать метод капсулирования с использованием натуральных олигосахаридов, например, β-циклодекстрин (β-ЦД), получаемых из картофельного крахмала. Получение клатратных комплексов действующих субстратов с циклическими декстринами будет способствовать повышению их водорастворимости, биодоступности и химической стабильности [6]. Кроме того, данный подход может обеспечивать пролонгирование периода полувыведения активного компонента и, как следствие, снижение терапевтической дозы препарата. Включение молекул известных лекарственных средств в комплексы с циклодекстринами или их производными может приводить к модификации их физико-химических и фармакокинетических характеристик, что потенциально усиливает терапевтическую эффективность по сравнению с исходными соединениями.

Материалы и методы. Объектами исследования служили 2-((2-изоникотиноилгидразоно) метил) бензойной кислоты, β-циклодекстрин и их комплекс включения (5). В этом исследований нами приведены новые научные результаты по получению противовирусного средства (5), а также описана его технологическая схема получения. Исходное новое соединение (3) получен методом химической трансформации строения гидразида изоникотиновой кислоты (ГИНК) (1) с использованием расчетного количества 2-формилбензойной кислоты в спиртовой среде.



(1) (2) (3)

Инфракрасные спектры соединения (3) регистрировали на спектрометре ФСМ-1201 с использованием таблеток KBr. Спектры ЯМР ^{1}H и ^{13}C получали на приборе JNM-ECA Jeol 400 при рабочих частотах 399,78 и 100,53 МГц соответственно, в качестве растворителей применяли ДМСО-d_6 и $CDCl_3$. Значения химических сдвигов (δ, м.д.) в спектрах ^{1}H и ^{13}C определяли относительно сигналов остаточных протонов либо атомов углерода дейтерированных растворителей. Контроль химической чистоты синтезированных соединений и хода реакций осуществляли методом тонкослойной хроматографии на пластинах Silufol UV-254 с визуализацией зон парами йода. Температуры плавления измеряли на приборе SMP10. Исследование противовирусной активности нового соединения выполнено в НПЦ «Микробиологии и вирусологии»

(г. Алматы) под руководством А. П. Богоявленским.

Продолжая исследования в этом направлений, с целью перевода в водорастворимую форму синтезированного нами нового гидразона изоникотиновой кислоты (3), получен его клатратный комплекс включения «гость-хозяйн» (2-((2-изоникотиноилгидразоно)метил) бензойная кислота:β-ЦД) с β-олигосахаридом (5) в соотношений 1:2 в водно-спиртовой среде.

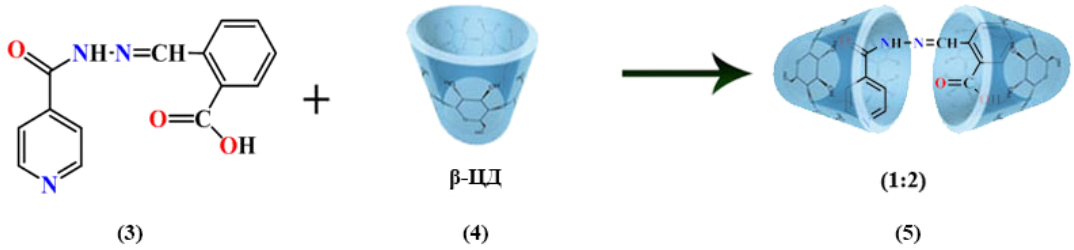


Рис. 1 - Схема образования капсулированной формы соединения (5)

Далее была разработана лабораторная технологическая схема получения новой противовирусной субстанций «Гинказон».

Стадия 1. Взвешивание гидразида изоникотиновой кислоты и 2-формибензойной кислоты. Взвешивают 2,74 г (гидразида изоникотиновой кислоты), 3 г 2-формибензойной кислоты передают на стадию 2.

Подготовка растворителя. В мерный цилиндр приливают 50 мл этанола и передают на стадию 2.

Стадия 2. Синтез (2-((2-изоникотиноилгидразоно)метил) бензойной кислоты.

Стадия 3. Реакционную массу переносили в чашку Петри и выдерживали на воздухе до испарения основной части растворителя. Оставшийся растворитель удаляли путём упаривания под пониженным давлением с использованием роторного испарителя.

Осаждение реакционной смеси. Реакционную смесь охлаждают, при этом выпадает осадок белого цвета.

Стадия 4. Фильтрация осадка. Образовавшийся при охлаждении осадок отделяют фильтрованием и дважды промывают гексаном, сушат и получают субстанцию (2-((2-изоникотиноилгидразоно)метил) бензойной кислоты. Полученный технический продукт передают на стадию 5.

Стадия 5,6. Обработка фильтрата. Очистку продукта производят в изопропиловом спирте путем перекристаллизации. Остаток маточника выпаривают на роторном испарителе.

Стадия 7. Для выделения субстанции растворитель отгоняют в вакууме, остаток хроматографируют на колонке с силикагелем (элюент - хлороформ, смесь хлороформа с этанолом (100:1 → 10:1).

Стадия 8. Получение водорастворимой формы (2-((2-изоникотиноилгидразоно)- метил) бензойной кислоты с β-циклодекстрином - (5). К раствору 0,067 г (0,00025 М) (2-((2-изоникотиноилгидразоно)метил) бензойной кислоты в 10 мл этанола при перемешивании добавляют 0,56 г (0,0005 М) β-циклодекстрина в 10 мл воды. Реакционную массу выдерживают при перемешивании в интервале температур 50-65°С в течение 3 часов. Выход (5) 63 %, т. пл. 275-283^{o}С. Белый порошок.

Стадия 9. Фильтрация осадка. Осадок, образовавшийся в процессе охлаждения, подвергают фильтрации, сушат и получают водорастворимую форму (5). Полученный комплекс передают на стадию 10.

Стадия 10. Реакционную массу переносят в чашку Петри и выдерживают на воздухе до испарения основной части растворителя. Оставшийся растворитель удаляют путём упаривания под вакуумом с использованием роторного испари-

теля.

Полученное соединение (5) отфильтровывают, промывают и сушат. На первом этапе субстанцию (5) высушивают на фильтровальной бумаге, на втором этапе - в вакуумном сушильном шкафу до постоянной массы (температура 50-60°С).

Стадия 11. Готовый продукт. Субстанция (5) должен иметь вид белого порошка, без запаха. Субстанцию взвешивают на весах и упаковывают.

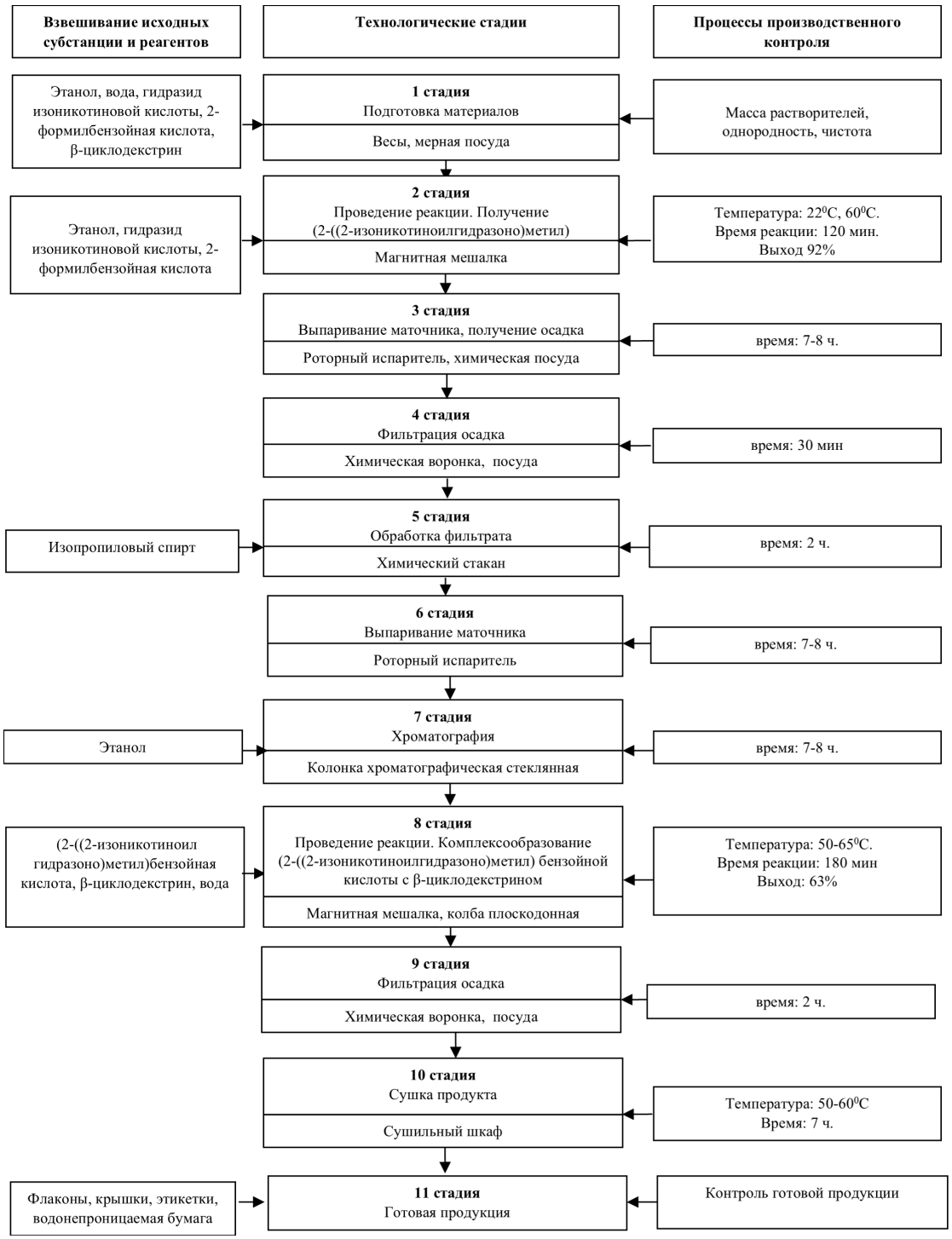
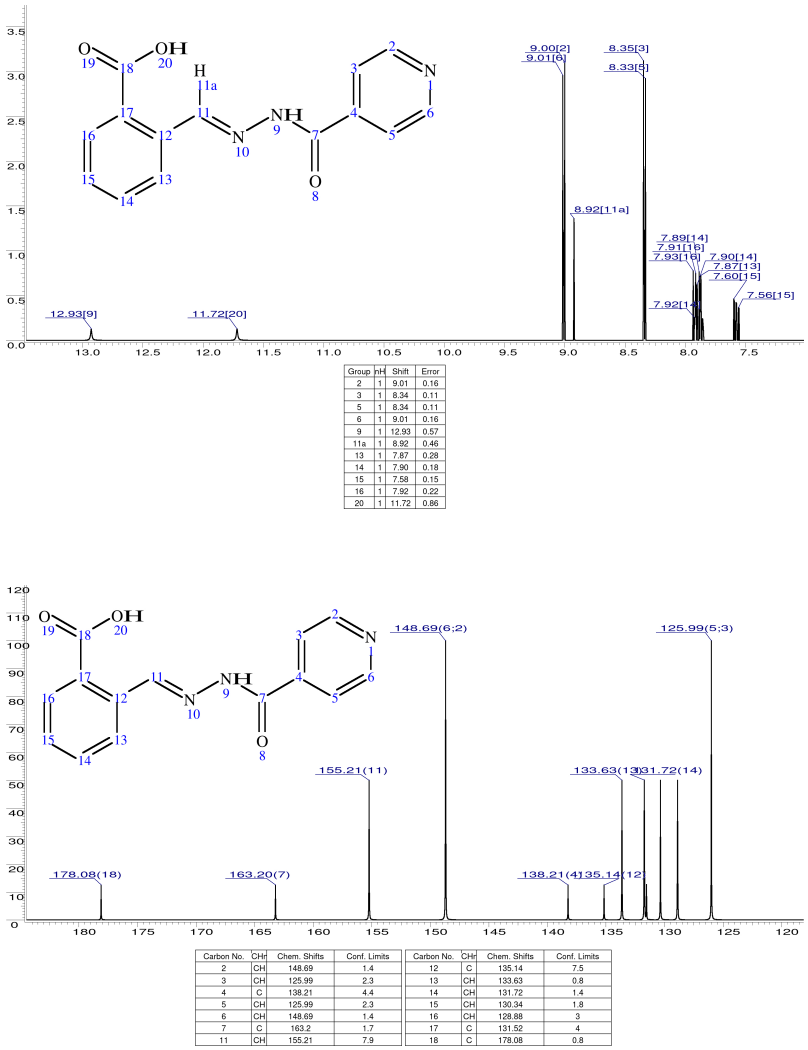


Рис.2 - Схематическое описание стадии получения субстанции (5)

Обсуждение и результаты.

Методика получения 2-((2-изоникотиноилгидразоно)метил) бензойной кислоты (3). К смеси 2,74 г (0,02 М) гидразида изоникотиновой кислоты в 20 мл этанола добавляют при перемешивании 3 г (0,02 М) 2-карбоксибензальдегида в 30 мл этанола. Реакционную смесь перемешивают при температуре 60°С в течение 2 часов, а затем охлаждают до комнатной температуры. Продукт отфильтровают, промывают и сушат. Перекристаллизация из изопропанола дала (3) в виде белого порошка. Выход 92 %, т. пл.205-206°С.

ИК спектр (KBr), ν, см$^{-1}$: 3425 (NH), 1655 (СОамид), 1608 (C=N), 1547 (аром.). Спектр ЯМР ^{1}H (ДМСО-d_6), δ, м.д., (*J*, Гц): 7.49-7.51 (1H, м, H^{15}), 7.60-7.62 (1H, м, H^{13}), 7.80 (2H, с, $H^{3,5}$), 7.86-7.89 (1H, м, H^{14}), 8.02-8.05 (1H, м, H^{16}), 8.73 (2H, с, $H^{2,6}$), 9.18 (1H, д, H^{11}, ^{3}J = 5.2), 12.25 (1H, с, H^{9}), 12.08 (1H, с, H^{20}). Спектр ЯМР ^{13}C (ДМСО-d_6), δ_C, м.д.: 127.27 (C^{16}), 130.43 (C^{17}), 130.88 (C^{15}), 131.33 (C^{13}), 134.88 (C^{12}), 122.14 ($C^{3,5}$), 148.36 (C^{4}), 150.83 ($C^{2,6}$), 148.36 (C^{11}), 162.34 (C^{7}), 168.55 (C^{18}). Спектр ЯМР COSY: $H^{15} \rightarrow H^{13}$, $H^{15} \rightarrow H^{14}$, $H^{13} \rightarrow H^{16}$, $H^{3,5} \rightarrow H^{2,6}$. Спектр ЯМР HMQC: $H^{3,5} \rightarrow C^{3,5}$, $H^{15} \rightarrow C^{15}$, $H^{13} \rightarrow C^{13}$, $H^{14} \rightarrow C^{14}$, $H^{16} \rightarrow C^{16}$, $H^{2,6} \rightarrow C^{2,6}$, $H^{11} \rightarrow C^{11}$. Спектр ЯМР HMBC: $H^{3,5} \rightarrow C^{2,6}$, $H^{3,5} \rightarrow C^{7}$; $H^{2,6} \rightarrow C^{3,5}$, $H^{2,6} \rightarrow C^{4}$; $H^{11} \rightarrow C^{12}$, $H^{11} \rightarrow C^{16}$; $H^{19} \rightarrow C^{7}$, $H^{19} \rightarrow C^{11}$. Масс-спектр, m/z, ($I_{отн}$,%): 270.142 (100) [M+H]+.



Group	nH	Shift	Error
2	1	9.01	0.16
3	1	8.34	0.11
5	1	8.34	0.11
6	1	9.01	0.16
9	1	12.93	0.57
11a	1	8.92	0.46
13	1	7.87	0.28
14	1	7.90	0.18
15	1	7.58	0.15
16	1	7.92	0.22
20	1	11.72	0.86

Carbon No.	CHn	Chem. Shifts	Conf. Limits	Carbon No.	CHn	Chem. Shifts	Conf. Limits
2	CH	148.69	1.4	12	C	135.14	7.5
3	CH	125.99	2.3	13	CH	133.63	0.8
4	C	138.21	4.4	14	CH	131.72	1.4
5	CH	125.99	2.3	15	CH	130.34	1.8
6	CH	148.69	1.4	16	CH	128.88	3
7	C	163.2	1.7	17	C	131.52	4
11	CH	155.21	7.9	18	C	178.08	0.8

Рис.3 - ^{1}H, ^{13}C ЯМР спектры 2-((2-изоникотиноилгидразоно)метил)бензойной кислоты (3)

Определение вирусоингибирующей активности. Для оценки вирусингибирующей активности исходного субстрата (3) были использованы штаммы вируса гриппа с различными антигенными характеристиками: A/Алматы/8/98 (H3N2) и A/Владивосток/2/09 (H1N1). Исследование вирусингибирующего эффекта образцов соединения (3) проводилось для определения химического терапевтического индекса (ХТИ) при концентрациях от 0,0016% до 0,2%, что соответствовало дозам 0,003-0,4 мг на куриный эмбрион (0,06–8 мг/кг) (табл.1). Из анализа полученных данных следует, что соединение (3) характеризуются высоким ХТ-индексом, что создает перспективу его для дальнейшего исследования. Установлено, что соединение (3) не проявляет токсические свойства. Вирусоингибирующая активность нового соединения (3) - в два раза выше, чем у тамифлю и ремантадина.

В таблице 1 приведена вирусоингибирующая активность нового гидразона (3) в сравнении с эталонными препаратами тамифлю и ремантадином.

Таблица 1 - Вирусингибирующая активность соединения (3) по отношению к вирусам гриппа

Соединение и внутренний шифр	Химический терапевтический индекс препаратов	
	A/Алматы/8/98 (H3N2)	A/Владивосток/2/09 (H1N1)
(3)	65,0	70,0
Тамифлю	29,9	30
Ремантадин	10.3	11

Молекулярное моделирование механизма образования клатратного комплекса включения. Исследование комплекса включения для системы «циклодекстрин-гидразон» в стехиометрии 1:1 позволило оценить афинность связывания двух реагирующих компонентов и сравнить эффективность образования комплекса. В качестве гостевой молекулы использовали гидразон (3), а в роли молекулярного рецептора - β-ЦД (рис.3) [7-9].

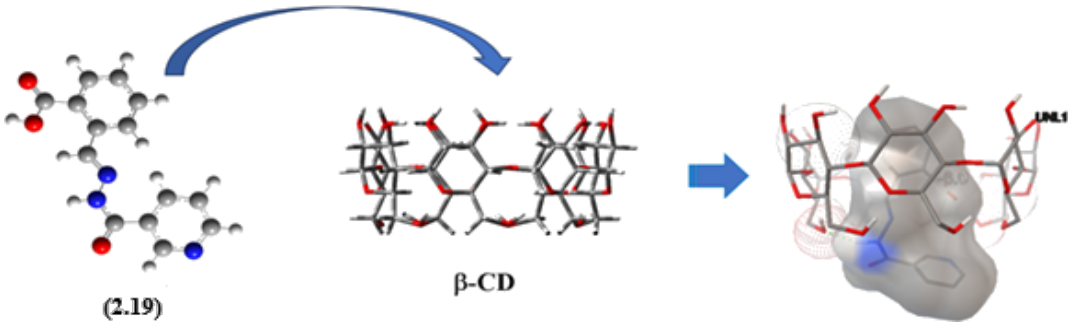


Рис.3 - Схематическое представление комплексообразования гидразона изоникотиновой кислоты (3) с β-циклодекстрином

Для подготовки молекулярных структур [10-11] к процедуре докинга их геометрия была предварительно оптимизирована методом DFT (RB3LYP/6-31G, модель растворителя CPCM), что позволило определить наиболее стабильные конформации и проанализировать их структурные характеристики. На рисунке 4 представлены оптимизированные геометрии энергетически предпочтительных конформаций гидразона и β-ЦД при образовании комплекса включения.

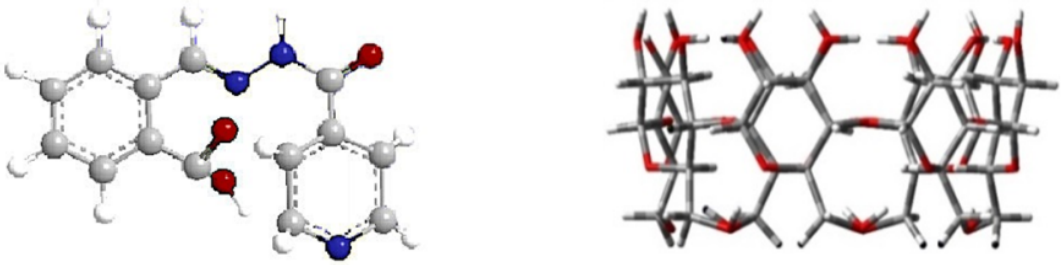


Рис.4 - Оптимизированные геометрии объектов исследования

Выводы. В результате выполненных исследований на основе химической модификации известного противотуберкулезного препарата изониазида получена его олигосахаридная композиция. Водорастворимый комплекс включения гинказона получена путем инкапсулирования 2-((2-изоникотиноилгидразоно)метил) бензойной кислоты с использованием β-олигосахарида. Проведено молекулярное моделирование механизма образования клатратных комплексов включения субстрата. Противовирусная активность исследуемого вещества с целью расчёта его ХТИ оценивалась в диапазоне концентраций 0,0016–0,2%, что эквивалентно дозировкам 0,003–0,4 мг на один куриный эмбрион (в пересчёте 0,06–8 мг/кг массы).

Вирусоингибирующая активность нового соединения в два раза выше, чем у тамифлю и ремантадина. Новое соединение и его водорастворимый комплекс характеризуются высоким химико-терапевтическим индексом, что создает перспективу его для дальнейших фармакологических исследований. Полученные результаты являются научной основой для разработки технологической схемы получения нового антивирусного средства с высокой активностью.

Литература

1. Wolker N., Howe C., Glover M., McRobbie H., Barnes J., et al. Cytisine versus Nikotine for Smoking Cessation // The New England Journal of Medicine. - 2014. - Vol.371(25). - P. 2353-2362. DOI 10.1056/nejmoa1407764.

2. Thomas D., Farrel M., McRobbie H., Tutka P., et al. The effectiveness, safety and cost-effectiveness of cytisine versus varenicline for smoking cessation in an Australian population: A study protocol for a randomized controlled non-inferiority trial // Addiction. -2018. -Vol.114(5). - P.923-933. DOI 10.1111/add.14541.

3. Fedorova V.A., Kadyrova R.A., Slita A.V., Muryleva A.A., Petrova P.R., Kovalskaya A.V., Lobov A.N., Zileeva Z.R., Tsypyshev D.O., Borisevich S.S., Tsypysheva I.P., Vakhitova J.V., Zarubaev V.V. Antiviral activity of amides and carboxamides of quinolizidine alkaloid (-)-cytisine against human influenza virus A(H1N1) and parainfluenza virus type 3 // Natural Product Research. -2021. -Vol.35(22). -P.4256-4264. DOI 10.1080/14786419.2019.1696791.

4. Prochaska J.J., Das S., Benowitz N.L. Cytisine, the world’s oldest smoking cessation aid // BMJ. - 2013. - Vol.347: f5198. DOI 10.1136/bmj.f5198.

5. Vakhitova Yu.V., Farabontova E.I., Zainullina L.F., Vakhitov V.A., Tsypysheva I., Yunusov M.S. Search of (-)-cytisine derivatives as potential inhibitors of NF-kB and STAT1 // Russian Journal of Biorganic chemistry. -2015. -Vol.41(3). -P.297-304. DOI 10.1134/S1068162015030103.

6. Tsypysheva I.P., Koval’skaya A., Petrova P., Lobov A., Borisevich S.S., Tsypyshev D., Fedorova V.A., Gorbunova E.A., Galochkina A.V., Zarubaev V.V. Diels-Alder Adducts of Nsubstituted Derivatives

of (-)-Cytisine as Influenza A/H1N1 Virus Inhibitors; Stereo differentiation of antiviral Properties and Preliminary Assessment of Action Mechanism // Tetrahedron.- 2019. -Vol.75(21). - P.2933-2943. DOI 10.1016/j.tet.2019.04.021.

7. Nurkenov O.A., Fazylov S.D., Satpaeva Zh.B., Seilkhanov T.M., Turdybekov D.M., Mendibayeva A.Zh., Akhmetova S.B., Shulgau Z.T., Alkhimova L.E., Kulakov I.V. Synthesis, structure and biological activity of hydrazones derived from 2- and 4-hydroxybenzoic acid hydrazides //Chemical Data Collections. -2023. -Vol.48: 01089. DOI10.1016/j.cdc.2023.101089.

8. Muldakhmetov Z., Fazylov S., Gazaliev A., Nurkenov O., Seilkhanov O. The synthesis of new inclusion compounds complexes cytosine-β-cyclodextrin // News of the national Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Series Chemistry and technology. -2022. -Vol. 2(451). - P.112-120. DOI 10.32014/2022.2518-1491.107.

9. Larsen K.L. Large cyclodextrins // Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry. -2002. -Vol.43(1). -P.1-13. DOI 10.1023/A:1020494503684.

10. Perkin E. Informatics (Computer software) // ChemOffice Professional. - 2019. (Version 19.0). URL: https://www.perkinelmer.com/category/chemdraw. -Дата обращения: 16.01.2026.

11. Revvity Signals Software, Inc. ChemDraw Professional (Version 22.2). -2023. URL: https://shop.revvitysignals.com/product/chemdraw-professional. -Дата обращения: 16.01.2026.

Сведения об авторах

Мендибаева А.Ж. - младший научный сотрудник, Институт органического синтеза и углехимии РК, Караганда, Казахстан, e-mail: anenyawa@mail.ru;

Фазылов С.Д. - академик НАН РК, доктор химических наук, Институт органического синтеза и углехимии РК, Караганда, Казахстан, e-mail: faz8990@mail.ru;

Кабиева С.К. - кандидат химических наук, Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, e-mail: kabieva.s@mail.ru;

Жаслан Р.К. - PhD, доцент, Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, e-mail: rymgul.zhaslan@mail.ru;

Жаутикова С.Б. - академик НАЕН РК, доктор медицинских наук, Карагандинский медицинский университет, Караганда, Казахстан, e-mail: zhautikova@qmu.kz;

Богоявленский А.П. - академик РАЕ, доктор биологических наук, профессор, РГП «Институт микробиологии и вирусологии», Алматы, Казахстан, e-mail: anpav_63@mail.ru;

Нуркенов О.А. - доктор химических наук, заведующий лабораторией СБАВ, Институт органического синтеза и углехимии РК, Караганда, Казахстан, e-mail: nurkenov_oral@mail.ru.

Information about the authors

Mendibayeva A.Zh. - Junior Researcher, Institute of Organic Synthesis and Coal Chemistry of the Republic of Kazakhstan, Karaganda, Kazakhstan; e-mail: anenyawa@mail.ru;

Fazylov S.D. - Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Doctor of Chemical Sciences, Institute of Organic Synthesis and Coal Chemistry of the Republic of Kazakhstan, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: faz8990@mail.ru;

Kabieva S.K. - Candidate of Chemical Sciences, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: kabieva.s@mail.ru;

Zhaslan R.K. - PhD, Associate Professor, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: rymgul.zhaslan@mail.ru;

Zhautikova S.B. - Academician of the Kazakhstan National Academy of Natural Sciences, Doctor of Medical Sciences, Karaganda Medical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: zhautikova@qmu.kz;

Bogoyavlensky A.P. - Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Doctor of Biological Sciences, Professor, The RSE ”Institute of Microbiology and Virology”, Almaty, Kazakhstan, e-mail: anpav_63@mail.ru;

Nurkenov O.A. - Doctor of Chemical Sciences, Institute of Organic Synthesis and Coal Chemistry of the Republic of Kazakhstan, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: nurkenov_oral@mail.ru.

МРНТИ 31.15.33, 61.53.15 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1445**

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ИНГИБИРУЮЩИХ СВОБОДНО ДИСПЕРСНЫХ ГИДРОГЕЛЕВЫХ ПРОМЫВОЧНЫХ СИСТЕМ КОАГУЛЯЦИОННОГО ТИПА

[1,2]О.В. Рожкова✉, [3]О.О. Ковалева, [1]Ж.А. Сеитова, [1]В.И. Рожков, [4]В.И Лебедева

[1]Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, Астана, Казахстан,
[2]АО «PolyTechPark», Алматы, Казахстан,
[3]Алтайский геолого-экологический институт, Усть-Каменогорск, Казахстан,
[4]ООО «Бентонит Хакасии», Черногорск, Россия

✉ *Корреспондент автор: rozhkova.o@stsolutions.kz*

В работе рассмотрены физико-химические основы формирования, стабилизации и управляемой пептизации ингибирующих свободнодисперсных гидрогелевых промывочных систем коагуляционного типа, применяемых в технологии строительства нефтегазовых скважин. Проведён сравнительный анализ глинистых и полимерных гидрогелей, выявлены ключевые ограничения их практического использования, связанные с низкой коагуляционной устойчивостью бентонитовых суспензий, а также термо- и биодеструкцией полимерных гелей.

На основе представлений DLVO-теории, коллоидной химии и термодинамики коагуляционных процессов обоснованы условия получения устойчивых бентонитовых гидрогелей с пептизированной дисперсной фазой. Показано, что предварительное разбавление глинистой суспензии до оптимальной концентрации коллоидных частиц, в сочетании с полимерной лиофилизацией поверхности дисперсной фазы, позволяет существенно снизить скорость медленной коагуляции и повысить электростатическую и структурно-механическую устойчивость системы.

Установлены закономерности влияния анионных и неионных полимеров полисахаридного ряда на формирование защитных адсорбционно-сольватных слоёв, величину электростатического барьера коагуляции и глубину вторичного потенциального минимума. Обоснована целесообразность комбинированного применения анионных (карбоксиметилцеллюлоза) и неионных (крахмал, лигносульфонаты) полимеров для обеспечения оптимального соотношения подвижности и прочности защитных слоёв.

Показано, что введение коагулирующих солей щелочных, щелочноземельных и амфотерных металлов приводит к развитию обратимой коагуляции во вторичном потенциальном минимуме за счёт снижения заряда поверхности глинистых частиц и частичного разрушения полимерных адсорбционных оболочек. Сформулированы основные правила управляемой пептизации полимер-глинистых систем, реализуемой механическим или ионным способом, и определены условия, при которых коагуляция сохраняет обратимый характер.

Полученные результаты позволяют целенаправленно регулировать реологические, структурно-механические и ингибирующие свойства гидрогелевых промывочных систем и могут быть использованы при разработке высокоэффективных малоглинистых и недиспергирующих буровых растворов для сложных термобарических условий.

Ключевые слова: бентонит, гидрогель, полисахарид, пептизация, коагуляция, полимер-глинистый раствор, лиофильная суспензия.

КОАГУЛЯЦИЯЛЫҚ ТИПТЕГІ ЕРКІН ДИСПЕРСТІ ГИДРОГЕЛЬДІ ЖҮЙЕЛЕРІН АЛУ ЖӘНЕ ТҰРАҚТАНДЫРУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

[1,2]О.В. Рожкова✉, [3]О.О. Ковалева, [1]Ж.А. Сеитова, [1]В.И. Рожков, [4]В.И Лебедева

[1]С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан,
[2]«PolyTechPark» АҚ, Алматы, Қазақстан,

[3]*Алтай геологиялық-экологиялық институты, Өскемен, Қазақстан,*
[4]*«Бентонит Хакасия» ЖШҚ,Черногорск, Ресей,*
e-mail: rozhkova.o@stsolutions.kz

Жұмыста мұнай-газ ұңғымаларын салу технологиясында қолданылатын коагуляциялық типтегі ингибирлеуші еркін-дисперсті гидрогельді жуу жүйелерін қалыптастырудың, тұрақтандырудың және басқарылатын пептизациялаудың физика-химиялық негіздері қарастырылған. Балшықты және полимерлі гидрогельдерге салыстырмалы талдау жүргізіліп, бентонитті суспензиялардың коагуляциялық тұрақтылығының төмендігімен, сондай-ақ полимерлі гельдердің термо- және биодеструкцияға ұшырауымен байланысты олардың практикалық қолданылуын шектейтін негізгі кемшіліктер анықталған.

DLVO-теориясының, коллоидтық химияның және коагуляциялық процестер термодинамикасының қағидалары негізінде пептизирленген дисперсті фазасы бар тұрақты бентонитті гидрогельдерді алудың шарттары негізделген. Балшықты суспензияны коллоидтық бөлшектердің оңтайлы концентрациясына дейін алдын ала сұйылту және дисперсті фазаның бетін полимерлік лиофилизациялау баяу коагуляция жылдамдығын едәуір төмендетіп, жүйенің электростатикалық және құрылымдық-механикалық тұрақтылығын арттыратыны көрсетілген.

Полисахаридтер қатарының аниондық және иондық емес полимерлерінің қорғаныш адсорбциялық-сольваттық қабаттардың түзілуіне, коагуляцияның электростатикалық тосқауылының биіктігіне және екіншілік потенциалдық минимумның тереңдігіне әсер ету заңдылықтары анықталған. Қорғаныш қабаттардың қозғалғыштығы мен беріктігінің оңтайлы арақатынасын қамтамасыз ету үшін аниондық (карбоксиметилцеллюлоза) және иондық емес (крахмал, лигносульфонаттар) полимерлерді біріктіріп қолданудың мақсатқа сай екендігі негізделген.

Сілтілік, сілтілік-жер және амфотерлік металдардың коагуляциялаушы тұздарын енгізу глинисті бөлшектер бетінің зарядының төмендеуі мен полимерлі адсорбциялық қабықшалардың ішінара бұзылуы нәтижесінде екіншілік потенциалдық минимум аймағында қайтымды коагуляцияның дамуына әкелетіні көрсетілген. Полимер-балшықты жүйелердің басқарылатын пептизациясының механикалық және иондық жолмен жүзеге асырылу ережелері тұжырымдалып, коагуляцияның қайтымды сипаты сақталатын жағдайлар анықталған.

Алынған нәтижелер гидрогельді жуу жүйелерінің реологиялық, құрылымдық-механикалық және ингибирлеуші қасиеттерін мақсатты түрде реттеуге мүмкіндік береді және күрделі термобарикалық жағдайлар үшін жоғары тиімді азбалшықты және диспергирленбейтін бұрғылау ерітінділерін әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: бентонит, гидрогель, полисахарид, пептизация, коагуляция, полимер-балшықерітіндісі, гидролиофильді суспензия.

FEATURES OF OBTAINING AND STABILIZING INHIBITORY FREE-DISPERSED HYDROGEL COAGULATION-TYPE FLUSHING SYSTEMS

[1,2]O.V. Rozhkova✉, [3]O.O. Kovaleva, [1]Zh.A. Seitova, [1]V.I. Rozhkov, [4]V.I. Lebedeva

[1]*S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan,*
[2]*JSC «PolyTechPark», Almaty, Kazakhstan,*
[3]*Altai Geological and Ecological Institute, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,*
[4]*LLC «Bentonite of Khakassia», Chernogorsk, Russia,*
e-mail: rozhkova.o@stsolutions.kz

The paper examines the physicochemical fundamentals of the formation, stabilization, and controlled peptization of inhibitory free - dispersed hydrogel flushing systems of the coagulation type used in oil and gas well construction. A comparative analysis of clay - based and polymer hydrogels was carried out,

and the key limitations of their practical application were identified, associated with the low coagulation stability of bentonite suspensions as well as the thermal and biodegradation of polymer gels.

Based on the concepts of DLVO theory, colloid chemistry, and the thermodynamics of coagulation processes, the conditions for obtaining stable bentonite hydrogels with a peptized dispersed phase were substantiated. It was shown that preliminary dilution of the clay suspension to an optimal concentration of colloidal particles, combined with polymer-induced lyophilization of the dispersed phase surface, significantly reduces the rate of slow coagulation and enhances the electrostatic and structural - mechanical stability of the system.

The regularities of the influence of anionic and nonionic polysaccharide-based polymers on the formation of protective adsorption - solvation layers, the height of the electrostatic coagulation barrier, and the depth of the secondary potential minimum were established. The expediency of the combined use of anionic (carboxymethyl cellulose) and nonionic (starch, lignosulfonates) polymers to ensure an optimal balance between the mobility and strength of protective layers was substantiated.

It was demonstrated that the introduction of coagulating salts of alkali, alkaline earth, and amphoteric metals leads to the development of reversible coagulation in the secondary potential minimum due to a decrease in the surface charge of clay particles and partial destruction of polymer adsorption shells. The basic rules for the controlled peptization of polymer - clay systems, implemented by mechanical or ionic methods, were formulated, and the conditions under which coagulation retains a reversible character were determined.

The obtained results make it possible to purposefully regulate the rheological, structural -mechanical, and inhibitory properties of hydrogel flushing systems and can be used in the development of highly efficient low-clay and non - dispersing drilling fluids for complex thermobaric conditions.

Keywords: bentonite, hydrogel, polysaccharide, peptization, coagulation, polymer-clay solution, lyophilic suspension.

Введение. Гидрогелевые промывочные жидкости находят широкое практическое применение в технологии строительства нефтегазовых скважин. Данные системы отличаются способом получения и природой структурообразователя: полимерные гидрогели, глинистые гидрогели, солевые гидрогели. Полимерные и глинистые гидрогели относятся к растворам с диспергированной фазой, солевые гидрогели - коллоидные системы с конденсированной фазой.

В технологии получения структурированных буровых растворов традиционным является диспергационный способ. Основным структурообразователем является глина, которая после ввода гидратируется, диспергируется и создает коагуляционную структуру суспензии. В такой суспензии удерживаются другие диспергированные материалы - утяжелители, выбуренный шлам.

Минеральные гидрогели существенно дешевле полимерных аналогов, так как производятся из крупнотоннажных продуктов переработки и обогащения горных пород. В практике бурения наиболее распространенным минеральным гидрогелем является бентонитовый буровой раствор, использующий эффект набухания и диспергирования в водной среде слоистого алюмосиликата смектитового типа. Такого рода минеральные гидрогели можно отнести к системам с пептизированной дисперсной фазой.

Несмотря на все преимущества бентонитовых растворов (псевдопластические реологические характеристики, оптимальное соотношение цена/качество, возможность применения малоглинистых ингибирующих и недиспергирующих систем и др.), тем не менее, они обладают рядом недостатков, существенно ограничивающих их применение: высокий уровень адгезии глинистой поверхности к металлу и породам, что приводит к образованию сальников; низкая коагу-

ляционная устойчивость глинистой суспензии в условиях притока пластовых вод и под действием высоких температур; большие объемы наработки при бурении в гигроскопичных глинах; относительно низкое качество крепления скважин обсадными колоннами в результате контракционного изменения остатков глинистой фильтрационной корки.

Материалы и методы. Гидрогели на основе полимеров имеют вязкопластический характер течения и обратимое восстановление реологических характеристик при циркуляции раствора в кольцевом пространстве [1-4]. В водно-полимерных гелях основными структурно-механическими единицами являются макромолекулы, участвующие в построении единой пространственной структурной сетки за счет донорно-акцепторных или ионных связей (рис.1). Примером ионного механизма формирования полимерного гидрогеля является координация функциональных групп полиэлектролитов (КМЦ, ГПАА, гипан) вокруг катионов поливалентных металлов [5,6]. Прочность таких гелей возрастает с увеличением мольной доли катиона-комплексообразователя. В работе [7] представлен механизм образования пространственно-сшитых полимерных структур за счет подандных взаимодействий между функциональными группами полианионов (КМЦ, ПАЦ) и полиэфирными цепочками неионных ПАВ (полиоксиэтилен (ПОЭ), неонол, проксанол и др.).

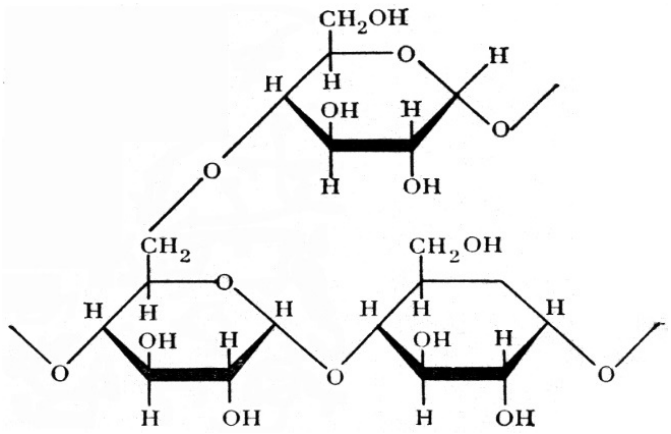


Рис.1 - Поперечно-сшитый полимерный гидрогель

В этом случае полиоксиэтиленовые группы ПАВ образуют с противоионами (Na^+) ассоциированный поликатион, способный к формированию пространственной структуры за счет интерполимерного комплексообразования с макромолекулами анионного стабилизатора.

В водных растворах ксантанового биополимера формируются водородные связи между соседними макромолекулами, отличающимися регулярным чередованием разветвлений трисахаридов (рис.2).

Это обеспечивает оптимальное соотношение структурных и реологических свойств биополимерных гелей, которые, однако, весьма неустойчивы к термобарическим воздействиям [8]. Повышенной прочностью структуры обладают полимер-дисперсные гели, образованные неионогенными полимерами (ОЭЦ, ГЭЦ, ПОЭ) и солями переходных и амфотерных элементов (Fe, Ni, Al) [5, 6].

Накопленные данные о физико-химических и технологических свойствах полимерных гидрогелей с различной природой пространственного структурообразования позволяют утверждать, что эти системы сочетают высокие структурные и вязко-пластичные свойства, а также значительные ингибирующие и смазочные характеристики, свойственные насыщенным эмульсионным системам.

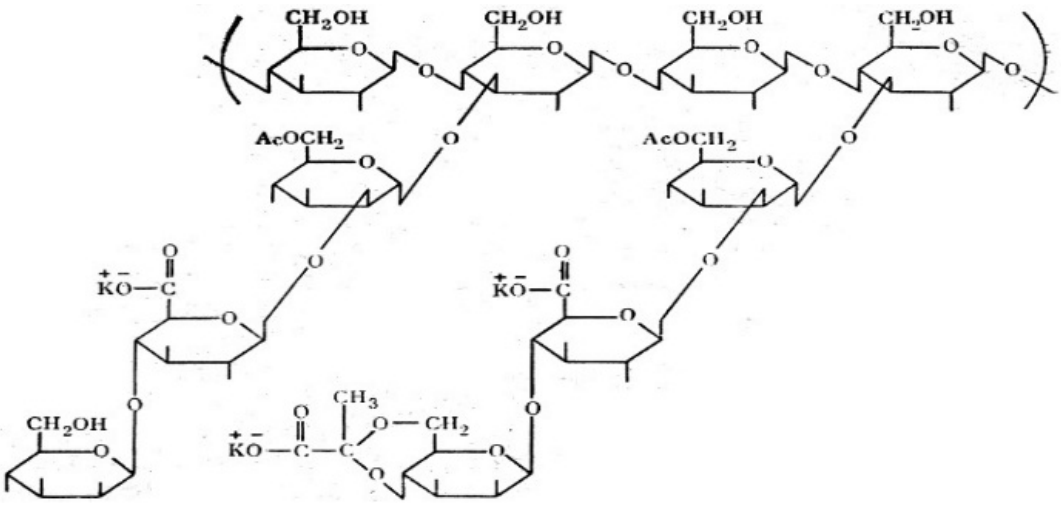


Рис.2 - Гидрогель с разветвленной структурой базового полимера, образующего систему водородных связей

Тем не менее, полимерные гидрогели имеют несколько существенных недостатков, связанных с особенностями их коллоидно-химического строения.

Во-первых, прочность структуры полимерного гидрогеля изменяется симбатно пластической вязкости (η), поэтому в такой системе практически невозможно достичь псевдопластической реологии. Иначе говоря, величина пластической вязкости многократно превосходит первое значение статического напряжения сдвига (η» $СНС_1$), что приводит к недостаточной выносящей способности бурового раствора и повышенным гидравлическим сопротивлениям [9].

Во-вторых, время жизни полимерного гидрогеля ограничено устойчивостью базового полимера к био- и термодеструкции. Кроме того, данные гели хорошо смачивают поверхность смектитовыхминералов, что приводит к большой наработке бурового раствора при бурении в активных глинах.

Обсуждение и результаты. Для преодоления недостатков, характерных для глинистых и полимерных гидрогелей (высокая гидрофильность и низкая коагуляционная устойчивость бентонитовыхгидрогелей, термо- и биодеструкция полимерных гелей) были разработаны и исследованы свободнодисперсные системы ингибирующего типа, содержащие в рецептуре катионы калия, кальция или алюминия.

Перед введением солей-ингибиторов необходимо обеспечить максимальную устойчивость глинистой (бентонитовой) суспензии. Повышение устойчивости гидрозоля состоит из следующих этапов:

- снижение скорости медленной коагуляции системы;

- максимальная лиофилизация частиц дисперсной фазы.

На первом этапе бентонитовую суспензию, используемую в качестве бурового раствора для бурения вышележащих интервалов, разбавляют водой до условной вязкости 30 – 35 с. При этом, достигаются две цели: снижается концентрация коллоидных частиц (менее 5 мкм) до 20 - 25 кг/м^3, а также снижается концентрация присутствующих в системе водорастворимых солей (хлориды и гидрокарбонаты натрия).

Необходимость снижения концентрации частиц дисперсной фазы продиктована тем, что время Z, в течение которого количество частиц в результате коагуляции уменьшится в 2 раза, обратно пропорционально исходной концентрации дисперсных частиц (1):

$$Z = \frac{3\eta}{8RT\upsilon_o\alpha}, \quad (1) \qquad (1)$$

где

Z - время, в течение которого половина частиц скоагулирует;
k - константа Больцмана;
T - абсолютная температура;
υ_o - исходная концентрация коллоидных частиц глины;
η - динамическая вязкость дисперсионной среды;
α - доля активных соударений частиц, сопровождающихся актом коагуляции.

Кроме того, в результате разбавления гидрозоля снижается концентрация С 1-1-валентного электролита в дисперсионной среде. При этом, толщина диффузного слоя, предохраняющего частицы дисперсной фазы от коагуляции, увеличивается, что приводит к повышению электрокинетического потенциала (потенциал, обуславливающий взаимное отталкивание дисперсных частиц) и, как следствие, повышается устойчивость суспензии.

Признаком достаточности разбавления, наряду со снижением условной вязкости, является уменьшение статического напряжения сдвига до 5/9 Фунт/100Фут^2. Это означает, что суспензия находится в состоянии медленной коагуляции (частицы размещены в потенциальных ямах, и система характеризуется дальним порядком), однако, Ван-дер-Ваальсовые силы притяжения между соседними частицами находятся на достаточно безопасном низком уровне для коагуляционной системы. Тиксотропия золя (отношение $СНС_{10}/СНС_1$), характеризующая скорость медленной коагуляции, для разбавленной суспензии не должна превышать 2.

Важной характеристикой готовности суспензии к введению коагулирующей соли является пластическая вязкость, которая не должна превышать 10 – 13 мПа·с. Это означает, что глинистые дисперсные частицы имеют минимальный размер, и в системе отсутствует коагуляция.

Целью полимерных обработок предварительно разбавленной суспензии являются:

- повышение отрицательного заряда поверхности дисперсных частиц глины;

- увеличение толщины диффузной оболочки, окружающей коллоидные частицы;

- обеспечение сорбционно-сольватного и структурно-механического факторов устойчивости глинистой суспензии;

- аккумуляция коагулирующих катионов в составе водорастворимых ион-дипольных комплексов, существующих в дисперсионной среде бурового раствора.

Введение в суспензию полимерных реагентов, макромолекулы которых имеют отрицательный заряд (одноименный с зарядом поверхности дисперсных глинистых частиц), таких как, карбоксиметилированные производные целлюлозы, а также лигносульфонаты, приводит к появлению вокруг коллоидных частиц защитных адсорбционных слоев. При этом, эффективный отрицательный заряд поверхности дисперсных частиц увеличивается, и, соответственно, повышается энергия отталкивания соседних дисперсных частиц, изменяющаяся в соответствии с уравнением Дерягина-Ландау (2):

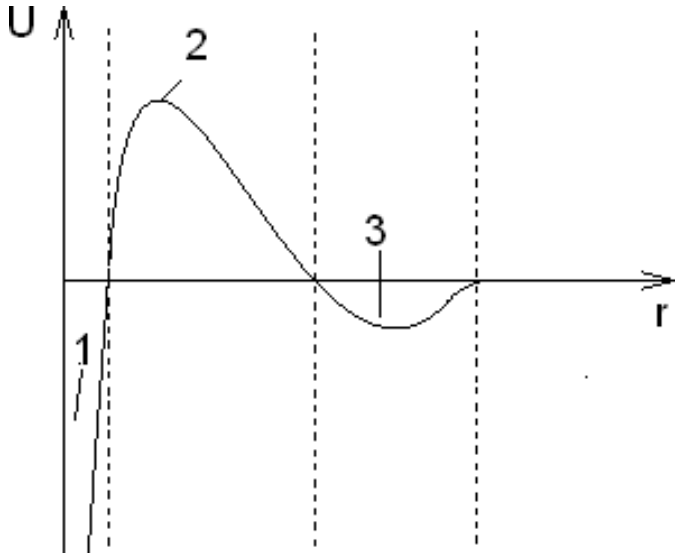
$$U = 64\left(\frac{cRT}{\kappa}\right)W^2 e^{-\kappa h} - \frac{A}{h^2}, \qquad (2)$$

где
c - концентрация электролита в дисперсионной среде;
κ - величина, обратная толщине диффузной оболочки;
W - параметр, пропорциональный отрицательному потенциалу поверхности коллоидной глинистой частицы;
h - расстояние между соседними коллоидными частицами;
A - константа Гамакера, характеризующая Ван-дер-Ваальсово притяжение между соседними коллоидными частицами.

Согласно данному уравнению, на дальних расстояниях между коллоидными частицами преобладает притяжение (вторичный потенциальный минимум (потенциальная яма)). На средних расстояниях между коллоидными глинистыми частицами преобладает отталкивание (электростатический барьер коагуляции). На ближних расстояниях, при максимальном сближении коллоидных частиц, преобладает притяжение – пер-

вичная потенциальная яма.

Возможность коагуляции определяется высотой барьера и глубиной потенциальных ям (рис.3).



1 - Первичный потенциальный минимум (яма); 2 - Электростатический барьер отталкивания; 3 - Вторичный потенциальный минимум (яма)

Рис.3 - Зависимость полной энергии взаимодействия коллоидных частиц от расстояния (r) между ними

Для глинистой суспензии электростатический барьер достаточно велик (значительно превышает величину теплового движения частиц k·T), а вторичный потенциальный минимум также много больше k·T. Происходит дальнее взаимодействие двух коллоидных частиц, фиксируемых на расстоянии порядка 100 нм, отвечающем вторичной потенциальной яме. При этом наблюдается акт медленной коагуляции, и к данным частицам присоединяются также на дальних расстояниях другие частицы, что и приводит к появлению структурированного золя, обладающего статическим напряжением сдвига.

Таким образом, величина СНС косвенно характеризует энергию Ван-дер-Ваальсового притяжения частиц (глубину вторичной потенциальной ямы), а тиксотропия суспензии ($СНС_{10}/СНС_1$) - скорость медленной коагуляции во вторичной потенциальной яме.

Таким образом, введение отрицательно заряженных полимеров повышает величину параметра W пропорциональную заряду дисперсной частицы, что, соответственно, приводит к повышению энергии отталкивания между частицами, уменьшению глубины вторичной потенциальной ямы, что проявляется в снижении величины СНС суспензии (рис.4). Вряду 1÷3 увеличивается концентрация анионного полимера и, соответственно, увеличивается высота электростатического барьера отталкивания и снижается глубина второго потенциального мини-мума.

Отсюда следует, что полимерные обработки должны приводить к снижению СНС глинистой суспензии.

При введении в глинистую суспензию, как заряженных, так и неионных полимеров (крахмал, оксиэтилцеллюлоза и пр.) происходит формирование полимерных адсорбционных слоев на поверхности частиц дисперсной фазы, за счет которых толщина диффузной оболочки коллоидной частицы увеличивается. При этом происходит рост энергии отталкивания частиц в области второго потенциального минимума и повышается коагуляционная устойчивость системы (рис.5). Вряду 1÷4 увеличивается концентрация неионного полимера.

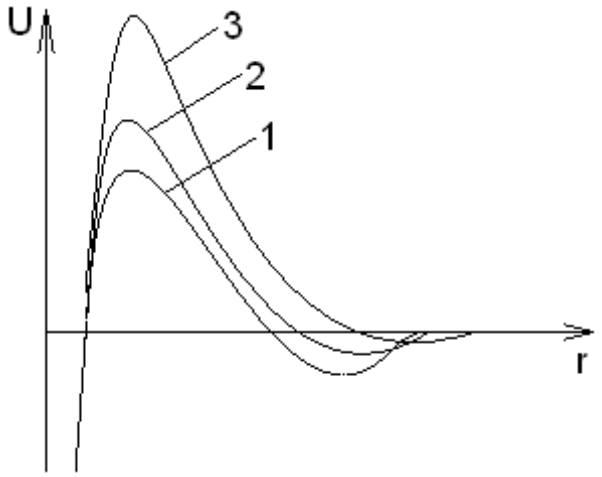


Рис.4 - Влияние концентрации анионных полимеров на полную энергию взаимодействия коллоидных частиц

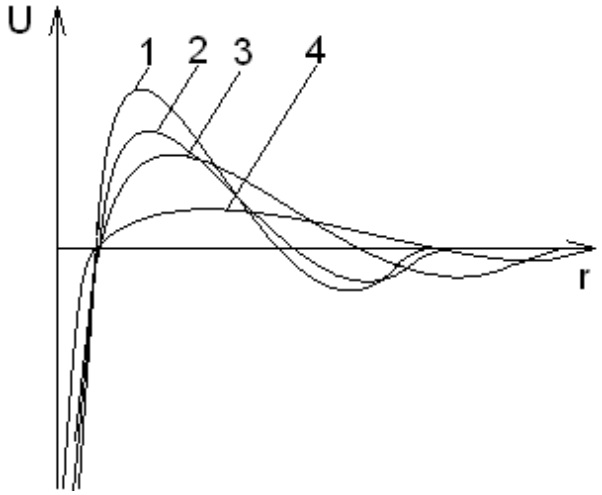


Рис.5 - Влияние концентрации неионогенных полимеров на полную энергию взаимодействия коллоидных частиц

Обеспечение сорбционно-сольватного и структурно-механического факторов устойчивости глинистой суспензии осуществляется, во-первых, за счет введения полимеров в глинистую суспензию, которое существенно повышает динамическую вязкость дисперсионной среды, что приводит к замедлению коагуляционных процессов (полупериод коагуляции возрастает). Во-вторых, адсорбция полимеров на поверхности коллоидных глинистых частиц приводит к образованию весьма развитых сольватных слоев. Большие размеры макромолекул полимеров, несущих собственные сорбционно-сольватные слои значительной протяженности и прочности, создают на поверхности коллоидных частиц адсорбционно-сольватные слои значительной плотности, которые перекрывают не только первичную, но и вторичную потенциальную яму. Устойчивость таких лиофилизированных суспензий весьма высока. Таков механизм формирования структурно-механического барьера коагуляции.

Прочность полимерных адсорбционных слоев увеличивается во времени, достигая предельного значения лишь через несколько часов, что связано с замедленной диффузией макромолекул и медленной их ориентацией на поверхности коллоидных частиц. Поэтому, после введения в глинистую суспензию полимерной обработки, следует в течение достаточно длительного времени (минимум 1 – 1,5 часа) перемешивать суспензию в блоке приготовления раствора. Коагулирующие соли вводят только через 1,5 – 2 ч. после того, как была произведена полимерная стабилизация глинистой суспензии.

Следует отметить, что стабилизацию глинистых суспензий наиболее часто производят анионными полимерами. При этом, влияние электрических зарядов функциональных групп полимера на прочность адсорбционных слоев оказывается весьма сложным. Так, повышение заряда (в результате диссоциации функциональных групп макромолекул), усиливающее гидратацию, создает отталкивание между макромолекулами, уменьшая боковую когезию, а, следовательно, и прочность адсорбционного слоя. В ряду производных полисахаридов прочность адсорбционных слоев повышается в ряду: ПАЦ → КМЦ → Крахмал → Гидроксиэтилцеллюлоза.

Поэтому, стабилизацию глинистой суспензии перед введением коагулирующих солей следует осуществлять за счет обработок КМЦ и солестойким крахмалом. Следует также поддерживать не слишком высокий уровень pH системы раствора (не более 9), при котором степень диссоциации карбоксильных групп полимера будет существенно ниже 1.

Недостатком неионных полимеров (крахмала)

является слишком высокая прочность насыщенного адсорбционного слоя, что приводит, в конце концов, к резкому снижению стабилизирующего действия. Это происходит вследствие того, что случайные разрывы сплошности адсорбционного слоя уже не могут «самозалечиваться» из-за «хрупкости» сверхпрочного адсорбционного слоя, который становится малоподвижным. Поэтому, при стабилизации глинистой суспензии оптимальной стратегией является сочетание анионных (КМЦ) и неионных полимеров. Анионные полимеры обеспечивают необходимую подвижность и мобильность защитных адсорбционных слоев, а неионные полимеры создают необходимую прочность адсорбционных слоев [9-11].

Наряду с высокой прочностью и вязкостью, полимерные адсорбционные слои обеспечивают устойчивость глинистых золей также за счет других факторов. Так, в зазоре между двумя частицами, окруженными сорбционно-сольватными слоями, происходит увеличение концентрации, что приводит к появлению осмотического расклинивающего давления, препятствующего коагуляции. Кроме того, коагуляция частиц, покрытых полимерными адсорбционными слоями запрещена вторым законом термодинамики, согласно которому энтропия системы стремится к максимуму. При сближении частиц, окруженных полимерными слоями, происходит резкое понижение энтропии вследствие ограничения свободы движения сегментов полимерных цепей при перекрытии адсорбционных слоев.

Применяемые для стабилизации глинистых суспензий полимерные реагенты должны обладать способностью к образованию водорастворимых ион-дипольных комплексов с коагулирующими катионами. Это обеспечивает снижение адсорбции катионов на поверхности дисперсных частиц, а также существенно повышает ингибирующий эффект полимер-глинистых растворов. К такого рода полимерам относятся производные полисахаридов – КМЦ, ПАЦ, крахмалы. Кроме того, коагуляционную устойчивость глинистых растворов существенно повышают полимеры, обладающие эфирным кислородом - полиоксиэтилен (ПОЭ), полиалкиленгликоли (сополимеры окисей этилена и пропилена), полипропиленгликоль (ППГ) и пр.

Выводы. Таким образом, при стабилизации глинистой суспензии перед введением коагулирующих солей необходимо следовать нескольким правилам:

1. Разбавление базового глинистого раствора, переведенного с предыдущего интервала, до концентрации коллоидных частиц (МВТ) не более 20 – 25 кг/м^3. Так как распределение коллоидных частиц по размерам для разных суспензий может сильно различаться, то вторичными признаками готовности суспензии для введения коагулирующей соли являются следующие значения технологических свойств: СНС=5/9 Фунт/100Фут^2, $\eta_{пл.}$<13 мПа·с, УВ<35 с, $СНС_{10}/СНС_1$ < 2.2. Введение полимерных реагентов для лиофилизации поверхности дисперсной фазы. Обязательным является введение полимеров в глинистую суспензию в виде водных растворов. Необходимо использовать два типа стабилизирующих полимеров – спирально ориентированные анионные (КМЦ) полимеры и гибкоцепные линейные либо неионные полимеры - лигносульфонаты, крахмалы. Не рекомендуется использовать сильнозарядные полимеры (ПАЦ), а также линейные полимеры с повышенной гибкостью углеводородной цепи (акрилаты, полиакриламиды). Первые из них (ПАЦ) из-за высокого заряда макромолекул образуют слишком разряженные и непрочные адсорбционные слои, а вторые (ГПАА) обладают повышенной гидрофобностью и гибкостью углеводородной матрицы (отсутствует эфирный кислород), что приводит к низкой устойчивости к действию коагулирующих катионов. Расход полимеров на предварительную стабилизацию глинистой суспензии составляет (в пересчете на 1 кг коллоидной глинистой фазы): 0,3 – 0,4 кгКМЦ; 0,7 - 0,8 кггибкоцепных лигносульфоната или крахмала.

3. После введения полимеров в глинистую суспензию следует произвести тщательное перемешивание раствора в течение не менее 1,5 часов для обеспечения защитных адсорбционных сло-

ев требуемой прочности.

4. Уровень pH полимер-глинистого раствора не следует повышать выше 9 – 9,5, чтобы не спровоцировать слишком большое повышение заряда полимерных макромолекул КМЦ, снижающее прочность защитных адсорбционных слоев.

После введения коагулирующей соли (алюмокалиевые квасцы, гипс, хлористый кальций и пр.) наблюдается увеличение вязкости полимер-глинистого раствора, а также повышение его структурных свойств (рост СНС). Причиной этого является повышение межмолекулярных Ван-дер-Ваальсовых сил, усиливающее притяжение между соседними частицами дисперсной глинистой фазы. То есть, происходит развитие коагуляции во вторичной потенциальной яме вследствие увеличения ее глубины.

Усиление притяжения между коллоидными частицами (углубление вторичной потенциальной ямы) происходит из-за того, что коагулирующие катионы (Ca^{2+}) образуют нерастворимые соединения с карбоксилатными группами макромолекул полимеров, образующих защитный адсорбционный слой. То есть, в адсорбционно-сольватных слоях возникают «бреши». Кроме того, коагулирующие катионы (Ca^{2+}, K^{+}) обладают способностью к нейтрализации поверхности глинистых коллоидных частиц в результате сорбции на их поверхности. Это приводит к снижению отрицательного заряда (и потенциала) поверхности дисперсных частиц, что снижает электростатическое отталкивание (электростатический «барьер») и увеличивает глубину вторичной потенциальной ямы.

При введении коагулирующих солей заряд коллоидных частиц уменьшается, прочность защитных полимерных адсорбционных слоев снижается, частицы подходят ближе друг к другу и, соответственно, развивается коагуляция системы во вторичном потенциальном минимуме. Из-за этого повышаются реологические и структурные характеристики полимер-глинистого раствора.

Если глинистая суспензия перед введением коагулирующих солей была как следует лиофилизирована полимерными обработками, то коагуляция во вторичном потенциальном минимуме носит обратимый характер, то есть, коагулированная система обладает способностью к пептизации.

Пептизация тем более вероятна, чем более лиофилизирована (обработана полимерами) глинистая суспензия и чем меньше времени прошло с момента коагуляции. С течением времени при ближнем взаимодействии происходит постепенное срастание частиц с уменьшением дисперсности и поверхностной энергии. В этом случае коагуляция приобретает необратимый характер, и пептизация исключается.

Различают два способа пептизации полимер-глинистой суспензии:

1. Механический способ. Данный метод заключается в том, что полимер-глинистая суспензия, загустевшая после введения коагулирующих катионов, должна быть, как можно быстрее деформирована путем интенсивного перемешивания с применением механических и гидравлических средств. Время перемешивания зависит от его интенсивности и составляет от 10 до 30 мин. Перемешивание может заменить циркуляция скоагулировавшего полимер-глинистого раствора через скважину в течение 1 - 2 циклов. При этом суспензия претерпевает весьма высокие деформации при прохождении через насадки гидромониторного долота.

Принцип механической пептизации заключается в том, что коллоидные дисперсные частицы, за счет приложенных сдвиговых усилий, смещаются друг относительно друга. Причем расстояние между соседними частицами увеличивается. В этот момент «бреши» в адсорбционных полимерных слоях затягиваются (происходит «самозалечивание» адсорбционных слоев) в результате диффузии макромолекул полимеров в направлении обедненных участков адсорбционного слоя. В результате, после прекращения действия сдвиговых деформаций, коллоидные частицы уже не могут подойти друг к другу на близкое расстояние - проявляется отталкивающее действие защитных адсорбционно-

сольватных оболочек. При этом, глубина вторичной потенциальной ямы уменьшается на несколько k·T, что приводит к снижению СНС и разжижению полимер-глинистого раствора.

2. Если лиофилизация суспензии произведена недостаточно тщательно (система обеднена полимерами) или концентрация коллоидной глинистой фазы повышена (МВТ >35 – 40 кг/м^3), то для осуществления пептизации скоагулировавшегополимер-глинистого раствора следует увеличить заряд и потенциал коллоидной глинистой частицы путем добавления электролита, содержащего потенциалообразующие (неиндифферентные) ионы. Для глинистой суспензии такими ионами являются анионы (отрицательные ионы), адсорбирующиеся на ребрах и сколах кристаллической решетки. Источниками таких анионов являются, например, НТФ, ТПФН, хроматы и бихроматы. Концентрация данных анионов в полимер-глинистом растворе для осуществления пептизации не должна превышать 0,1 – 0,3 кг/м^3.

Таким образом, механический и ионный механизмы пептизации по своей природе являются единым процессом, основанным на увеличении энергии отталкивания между коллоидными частицами за счёт повышения заряда и потенциала их поверхности, а также увеличения толщины диффузной оболочки, что приводит к дезагрегации глинистых частиц. Эффективная стабилизация глинистой суспензии перед введением коагулирующих солей достигается посредством её предварительного разбавления до оптимальной концентрации дисперсной фазы и последующей обработки сочетанием анионных полимеров (КМЦ) и неионных полимеров (крахмал, лигносульфонаты). Такое комплексное введение полимеров обеспечивает формирование прочных, но подвижных адсорбционно-сольватных слоёв, увеличивает электростатический и структурно-механический барьер, снижает склонность системы к коагуляции и формирует контролируемую, преимущественно обратимую структуру полимер-глинистого раствора.

Литература

1. Рожкова О.В., Ковалева О.О., Лебедева В.И., Ветюгов Д.А., Рожков В.И.. Исследование процесса окомкования высококачественного железорудного концентрата с применением новых связующих добавок // Вестник КазУТБ. -2025. -Т.2(27). -С.231-245. DOI 10.58805/kazutb.v.2.27-954.

2. Ibraimova D.M-K., Rozhkova O.V., Musabekov K.B., Tazhibayeva S.M., Rozhkov V.I., Yermekov M.T. Development of methods to obtain composite materials from organoclays // Eurasian Journal of Chemistry. -2023. -Vol.28. -No.4 (112). -P.101-111. DOI 10.31489/2959-0663/4-23-14.

3. Рожкова О.В., Муздыбаева Ш.А., Мусабеков К.Б., Ибраимова. Д.М.-К., Рожков В.И., Ермеков М.Т.. Разработка методов получения носителей лекарственных средств на основе органомодифицированных глин// Известия НАН РК. Серия химических наук. -2023. -Т.3: 456. -С.138-156. DOI 10.32014/2023.2518-1491.183.

4. Musabekov K.B., Rozhkova O.V., Artykova (Ibraimova) D.M-K., Yermekov M.T., Muzdybaeva Sh.A. Application of bentonite clay as a protective barrier in the disposal of radioactive waste from the nuclear industry of Kazakhstan // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series: Chemistry and Technology. -2023. -Vol. 1(454). -P.66-77. DOI 10.32014/2023.2518-1491.148.

5. Кошелев В.Н., Вахрушев Л.П., Беленко Е.В., Лушпеева О.А. Полимер-дисперсные синергетические явления и новые системы буровых растворов // Нефтяное хозяйство. -2001. - № 4. -С.22-23.

6. Беленко Е.В. Общие технологические принципы промывки скважин// Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. -2010. - № 3. - С.2-7.

7. Пеньков А. И., Кошелев В. Н., Вахрушев Л. П., Беленко Е. В., Лушпеева О. А. Применение термодинамики фазовых переходов для расчётов технологических параметров буровых растворов // Нефтяное хозяйство. - 2001. - № 9. - С.44-48.

8. Пеньков А.И., Шишов В. А., Федосов Р.И. Требования к растворам безглинистым и с низким содержанием твердой фазы // Нефтяное хозяйство. -1981. - № 5. - С.23.

9. Федосов Р. И., Пеньков А. И. Разработка экологически совместимых с окружающей средой буровых растворов для бурения и закачивания скважин на арктическом шельфе/ Вопросы промывки скважин с горизонтальными участками ствола. Краснодар. -1998. -С.49-53.

10. Беленко Е.В., Мазыкин С.В., Мнацаканов В.А. Принципы нормирования реологических и структурно-механических свойств утяжеленных полимерглинистых буровых растворов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море. - 2011. - № 7. - С.40-43.

References

1. Rozhkova O.V., Kovaleva O.O., Lebedeva V.I., Vetjugov D.A., Rozhkov V.I.. Issledovanie processa okomkovanija vysokokachestvennogo zhelezorudnogo koncentrata s primeneniem novyh svjazujushhih dobavok // Vestnik KazUTB. -2025. -T.2(27). -S.231-245. DOI 10.58805/kazutb.v.2.27-954.[in Russian]

2. Ibraimova D.M-K., Rozhkova O.V., Musabekov K.B., Tazhibayeva S.M., Rozhkov V.I., Yermekov M.T. Development of methods to obtain composite materials from organoclays // Eurasian Journal of Chemistry. -2023. -Vol.28. -No.4 (112). -P.101-111. DOI 10.31489/2959-0663/4-23-14.

3. Rozhkova O.V., Muzdybaeva Sh.A., Musabekov K.B., Ibraimova. D.M.-K., Rozhkov V.I., Ermekov M.T.. Razrabotka metodov poluchenija nositelej lekarstvennyh sredstv na osnove organomodificirovannyh glin// Izvestija NAN RK. Serija himicheskih nauk. -2023. -T.3(456). -S.138-156. DOI 10.32014/2023.2518-1491.183. [in Russian]

4. Musabekov K.B., Rozhkova O.V., Artykova (Ibraimova) D.M-K., Yermekov M.T., Muzdybaeva Sh.A. Application of bentonite clay as a protective barrier in the disposal of radioactive waste from the nuclear industry of Kazakhstan // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series: Chemistry and Technology. -2023. -Vol. 1(454). -P.66-77. DOI 10.32014/2023.2518-1491.148.

5. Koshelev V.N., Vahrushev L.P., Belenko E.V., Lushpeeva O.A. Polimer-dispersnye sinergeticheskie javlenija i novye sistemy burovyh rastvorov // Neftjanoe hozjajstvo. -2001. - № 4. -S.22-23. [in Russian]

6. Belenko E.V. Obshhie tehnologicheskie principy promyvki skvazhin// Vestnik Associacii burovyh podrjadchikov. -2 010. - № 3. - S.2-7. [in Russian]

7. Pen’ kov A. I., Koshelev V. N., Vahrushev L. P., Belenko E. V., Lushpeeva O. A. Primenenie termodinamiki fazovyh perehodov dlja raschjotov tehnologicheskih parametrov burovyh rastvorov // Neftjanoe hozjajstvo. - 2001. - № 9. - S.48-51. [in Russian]

8. Pen’ kov A.I., Shishov V. A., Fedosov R.I. Trebovanija k rastvoram bezglinistym i s nizkim soderzhaniem tverdoj fazy // Neftjanoe hozjajstvo. -1981. - №5. - S.23. [in Russian]

9. Fedosov R. I., Pen’ kov A. I. Razrabotka jekologicheski sovmestimyh s okruzhajushhej sredoj burovyh rastvorov dlja burenija i zakachivanija skvazhin na arkticheskom shel’ fe/ Voprosy promyvki skvazhin s gorizontal’ nymi uchastkami stvola. Krasnodar. -1998. -C. 49-53. [in Russian]

10. Belenko E.V., Mazykin S.V., Mnacakanov V.A. Principy normirovanija reologicheskih i strukturno-mehanicheskih svojstv utjazhelennyh polimerglinistyh burovyh rastvorov // Stroitel’ stvo neftjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i more. - 2011. - №7. - S.40-43. [in Russian]

Сведение об авторах

Рожкова О.В. - доктор химических наук, профессор, академик Национальной академии естественных наук Республики Казахстан, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина», Астана, Казахстан, АО «Science and Technology Solutions», Астана, Казахстан, e-mail: rozhkova.o@stsolutions.kz;

Ковалёва О.О. - магистр, ТОО ”Алтайский геолого-экологический институт”, Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: kovaleva@agikaz.pro;

Сеитова Ж.А. – кандидат технических наук, и.о. ассоцированного профессора, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина», Астана, Казахстан, zhadraseitova3110@gmail.com;

Рожков В.И. - кандидат технических наук, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина», Астана, Казахстан, e-mail: vitalrza1983@gmail.com;

Лебедева В.И. - заместитель генерального директора по стратегическому развитию, ООО «Бентонит Хакасии», Черногорск, Республика Хакасия, Россия, e-mail: lebedeva@bentonit.ru.

Information about the authors

Rozhkova O.V. - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Natural Sciences of the Republic of Kazakhstan, NAO ”Saken Seifullin Kazakh AgroTechnical Research University”, Astana, Kazakhstan, JSC ”Science and Technology Solutions”, Astana, Kazakhstan, e-mail: rozhkova.o@stsolutions.kz;

Kovaleva O.O. - Master of Nuclear Energy and Thermophysics, LLP ”Altai Geological-Ecological Institute”, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: kovaleva@agikaz.pro;

Seitova Zh.A. - Candidate of Technical Sciences, Acting Associate Professor, NAO ”Saken Seifullin Kazakh AgroTechnical Research University”, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhadraseitova3110@gmail.com;

Rozhkov V.I. - Candidate of Technical Sciences, NAO ”Saken Seifullin Kazakh AgroTechnical Research University”, Astana, Kazakhstan, e-mail: vitalrza1+983@gmail.com;

Lebedeva V.I. - Deputy General Director for Strategic Development, LLC ”Bentonite Khakassia”, Chernogorsk, Republic of Khakassia, Russia, e-mail: lebedeva@bentonit.ru.

IRSTI 65.63.91 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1421**

A RESEARCH OF THE COMPOSITION AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF BUTTERMILK CONCENTRATE OBTAINED THROUGH ULTRAFILTRATION

T.Ch. Tultabaeva, G.N. Zhakupova, K.K. Makangali, A.T. Sagandyk, A.K. Muldasheva, K.Sh. Dairova

«S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University», Astana, Kazakhstan

Corresponding author: dairova111@mail.ru

Under the growing demand for functional and diet-oriented dairy products, this study is devoted to the development of a fermented beverage technology enriched with high-quality protein through the rational utilization of secondary dairy resources – specifically, buttermilk subjected to ultrafiltration. The objective was to investigate the composition, physicochemical parameters, and sensory attributes of buttermilk concentrates obtained under varying ultrafiltration conditions, and to assess their technological viability within multicomponent dairy matrices.

Experimental trials revealed the impact of processing temperature (20–60 °C) on changes in pH, titratable acidity, fat and protein contents, as well as total solids, in both retentate and permeate fractions. Ultrafiltration proved highly effective at retaining protein and fat components with minimal loss, producing a concentrate of notable nutritional and biological value.

The resulting buttermilk concentrate was incorporated into dairy blends containing various ratios of cow's and goat's milk. Across four formulated variants, a consistent trend was observed: increasing the proportion of buttermilk concentrate led to a corresponding rise in total solids (from 18.25% to 35.50%) and protein content (from 6.01% to 14.00%).

Thus, buttermilk concentrate derived via ultrafiltration emerges as a promising ingredient for the next generation of functional dairy products - capable of enhancing protein content, contributing to desirable texture formation, and reducing overall fat levels in the final formulation.

Keywords: buttermilk, functional properties, permeate, retentate, ultrafiltration.

УЛЬТРАСҮЗГІЛЕУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН ІРКІТ КОНЦЕНТРАТЫНЫҢ ҚҰРАМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Т.Ч. Тултабаева, Г.Н. Жакупова, Қ.Қ. Мақанғали, А.Т. Сағандық, А.Х. Мулдашева, Қ.Ш. Даирова

«С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті», Астана, Қазақстан, e-mail: dairova111@mail.ru

Функционалдық және диеталық сүт өнімдеріне сұраныстың артуы жағдайында бұл зерттеу жоғары сапалы ақуызға бай ферменттелген сусындар технологиясын әзірлеуге бағытталған. Бұл мақсатқа сүт өнеркәсібінің екінші реттік ресурстарын, атап айтқанда, ультрасүзгіден өткен іркітті тиімді пайдалану арқылы қол жеткізілді. Зерттеудің мақсаты – іркіт концентраттарының құрамы, физика-химиялық және органолептикалық қасиеттерін әртүрлі ультрасүзу режимдерінде зерттеу, сондай-ақ оларды көп компонентті сүт қоспалары құрамында технологиялық тұрғыдан бағалау болды.

Жүргізілген тәжірибелер температураның (20–60 °C) pH, титрленетін қышқылдық, май, ақуыз және құрғақ заттардың мөлшеріне әсерін анықтады. Ультрасүзу процесі ақуыздар мен майларды ең аз жоғалту арқылы тиімді түрде ұстап, жоғары тағамдық және биологиялық құндылығы бар концентрат қалыптастыратыны дәлелденді.

Іркіт концентраты әртүрлі мөлшерде сиыр және ешкі сүтімен араласқан сүт негізіне енгізілді. Төрт тәжірибелік қоспада іркіт концентратының үлесі артқан сайын құрғақ заттар мөлшері (18,25%-дан 35,50%-ға дейін) және ақуыз мөлшері (6,01%-дан 14,00%-ға дейін) тұрақты түрде өсті.

Осылайша, ультрасүзу әдісімен алынған іркіт концентраты функционалдық сүт өнімдерін жасауға арналған келешегі зор ингредиент ретінде қарастырылады. Ол өнімнің ақуыздық құрамын байытып, құрылым түзілуіне ықпал етіп, дайын өнімнің майлылығын төмендетуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: іркіт, функционалдық қасиеттері, пермеат, ретентат, ультрасүзгілеу.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ КОНЦЕНТРАТА ПАХТЫ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ

Т.Ч. Тултабаева, Г.Н. Жакупова, К.К. Маканғали, А.Т. Сагандык, А.Х. Мулдашева, К.Ш. Даирова

«Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина», Астана, Казахстан, e-mail: dairova111@mail.ru

В условиях растущего спроса на функциональные и диетические молочные продукты данное исследование направлено на разработку технологии ферментированных напитков с повышенным содержанием полноценного белка за счёт рационального использования вторичных ресурсов молочной промышленности – в частности, пахты, подвергнутой ультрафильтрации. Целью работы стало изучение состава, физико-химических и органолептических свойств концентратов пахты, полученных при различных режимах ультрафильтрационной обработки, а также оценка их технологического потенциала в составе многокомпонентных молочных смесей.

Экспериментально установлено влияние температуры (20–60 °C) на изменение pH, титруемой кислотности, содержания жира, белка и сухих веществ в ретентате и пермеате. Установлено, что ультрафильтрация обеспечивает эффективное удержание белковых и жировых компонентов при минимальных потерях, формируя концентрат с высокой пищевой и биологической ценностью.

Концентрат пахты использован в составе молочной основы с различным соотношением коровьего и козьего молока. В четырёх опытных вариантах смеси наблюдалось закономерное увеличение массовой доли сухих веществ (от 18,25% до 35,50%) и белка (от 6,01% до 14,00%) при возрастании доли концентрата пахты.

Таким образом, концентрат пахты, полученный методом ультрафильтрации, является перспективным ингредиентом для функциональных молочных продуктов, обеспечивающим белковое обогащение, текстурообразование и снижение жирности готового продукта.

Ключевые слова: пахта, функциональные свойства, пермеат, ретентат, ультрафильтрация.

Introduction. One of the strategic priorities in the current development of the dairy industry is the formulation and implementation of technologies for functional food products that support rational nutrition, sustain physical and cognitive performance, and enhance the human immune system. In this context, a particularly relevant objective is the production of fermented dairy products enriched with high-quality proteins.

Although the market already offers a broad range of fermented dairy items, there remains a notable shortage of products with reduced fat content, those derived from secondary dairy raw materials – particularly buttermilk - and specialized dairy products tailored for individuals with health conditions such as diabetes or lactose intolerance.

At present, new categories of fermented dairy products are being developed with pronounced therapeutic and prophylactic properties. The functionalization of such products can be achieved by utilizing milk from various agricultural species, applying membrane processing technologies, and adopting low-waste or zero-waste production systems in the development of fermented dairy products.

The dairy industry faces a persistent shortage of primary raw materials, which brings to the forefront the issue of rational utilization of secondary dairy

resources such as skim milk, buttermilk, and whey.

Comprehensive utilization of all milk components can significantly diversify the product range and positively impact the technical and economic performance indicators, as well as labor productivity in dairy enterprises. Given their considerable volume and high nutritional and biological value, the collection and processing of skim milk, buttermilk, and whey become not only justified but essential [1].

In countries with advanced dairy sectors, buttermilk is widely employed in the manufacture of various dietary natural and cultured beverages, including numerous variants with flavorings and additives, as well as an ingredient in food formulations. To extend shelf life and more efficiently utilize available buttermilk resources - especially during peak milk processing periods for butter production-– the manufacture of buttermilk concentrates is considered preferable.

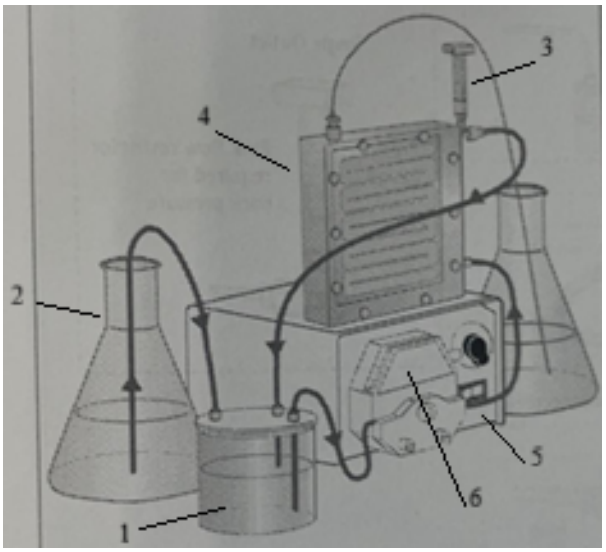
Materials and methods. In the course of the study, various dairy substrates were utilized as primary samples, chosen for their distinct protein-fat compositions and functional properties. The main object of analysis was buttermilk taken from the EC ”Astana-Onim” - a by-product of butter production characterized by reduced fat content and enriched with polar lipids as well as biologically active peptides.

By means of ultrafiltration of buttermilk using semipermeable membranes, two fractions were obtained:

- permeate, which predominantly contains low-molecular-weight compounds such as lactose, mineral salts, and soluble vitamins,

- retentate, enriched with proteins, phospholipids, and high-molecular-weight components [2].

The schematic representation of the ultrafiltration setup is shown in Figure 1.



The scheme of the ultrafiltration plant



The process of ultrafiltration of buttermilk

Fig.1 - The process of ultrafiltration of buttermilk

where, 1 - Sample / diafiltration reservoir, 2 - Filtrate versel, 3 - Pressure indicator, 4 - Pink flow restrictor, 5 - Masterflex pump, 6 - Masterflex easy load pump head.

In the VivaFlow ultrafiltration system, the process works as follows: the feed solution is placed in the diafiltration reservoir (1), from where it is pumped to the membrane using the Masterflex pump (5) with the Easy Load pump head (6). The membrane separates the liquid into concentrate and filtrate, with the filtrate collected in a separate vessel (2). System pressure is monitored by the

pressure indicator (3), and the flow is controlled by the pink flow restrictor (4), ensuring stable operation and efficient separation of the solution components.

Along with buttermilk and its derivatives, Simmental cow's milk from LLP «Moya ferma» and Saanen goat's milk from LLP «Arka Zerenda» were utilized in the study to enable a comparative analysis of species-specific differences in casein micelle structure and lipid composition.

Furthermore, the investigation included a buttermilk concentrate, produced by partial dehydration, aimed at modeling highly concentrated dairy systems.

Finally, the research incorporated blends of various dairy components, specifically prepared to explore synergistic effects between proteins, fats, and polar lipids within multiphase dairy matrices.

Active acidity (pH) was determined in accordance with «GOST 26188-84 - Food products. Method for pH determination», using an Atago pH meter, which ensures reliable and precise assessment of hydrogen ion concentration in the tested samples [3].

Titratable acidity (°T) was assessed using the acid-base titration method in accordance with «GOST 3624-92 - Milk and dairy products. Method for titratable acidity determination», providing an integral measure of all titratable acids present in the product [4].

Mass fraction of fats (%) was measured using Fourier-transform near-infrared (FT-NIR) spectroscopy on a Tango-R spectrometer, a rapid and non-destructive analytical method.

Mass fraction of proteins (%) was also determined using FT-NIR spectroscopy on the Tango-R device, which captures absorption spectra characteristic of protein molecular structures, serving as an effective alternative to classical chemical assays.

Mass fraction of dry substances (%) was determined according to «GOST 3626-73 - Milk and dairy products. Method for determination of dry matter content», by means of the refractometric method, which relates the refractive index of the sample to its concentration of dissolved solids [5].

The sensory analysis was carried out in accordance with GOST R ISO 22935-2-2011 «Milk and milk products. Sensory analysis. Part 2. Recommended methods for sensory evaluation» [6]. The tasting was attended by teachers and students of KATRU, a total of 7 degustators. The assessment was carried out in a tasting room at a temperature of (20 ± 2) ° C and diffused daylight, eliminating the influence of foreign odors and glare. The samples were presented in the same container, randomly, in increasing order of concentration of dry substances, with an interval of 2-3 minutes between assessments to restore taste buds. The sensory evaluation was carried out using a five-point scale, where 5 points corresponded to samples with the most desirable organoleptic characteristics and 1 point to those with pronounced defects or deviations from the standard. The results of the sensory evaluations were statistically processed by calculating the mean values and standard deviations.

Results and discussion. One of the promising avenues for the valorization of whey and buttermilk is membrane filtration, a technology that enables the selective separation of the product into two distinct fractions: permeate and retentate. The present study investigates the temperature-dependent changes (in the range of 20-60 °C) in the physicochemical properties of buttermilk and its ultrafiltration-derived fractions [7].

Ultrafiltration was performed using the Vivaflow 50/50R/200 system, and the technical specifications of the equipment are presented in Table 1.

The raw material - buttermilk - was poured into a product tank, from which it was transferred into a membrane module via a membrane pump. Within the module, the feed was separated into retentate (concentrate) and filtrate [8]. The ultrafiltration pressure was regulated using a needle valve and monitored by a manometer, while temperature was maintained by a heat exchanger. During the process, the retentate was recirculated back into the product tank, and the filtrate was collected in a separate container.

It is well established that increasing temperature

enhances filtration rate, whereas membrane selectivity remains largely unaffected. However, elevating the temperature beyond 40 °C can lead to the precipitation of soluble calcium and magnesium salts, resulting in pore blockage and a reduction in filtration efficiency [9].

Table 1 - Technical Specifications of the Ultrafiltration System Vivaflow 50/50R/200

Overall dimensions (length/height/width), mm	107/84/25
Channel dimensions (width/height), mm	15/0,3
Effective membrane area, cm²	50
Minimum recirculation volume, mL	10
Membrane material	TPX (PMF)
Manufacturer	SARTORIUS (UK)

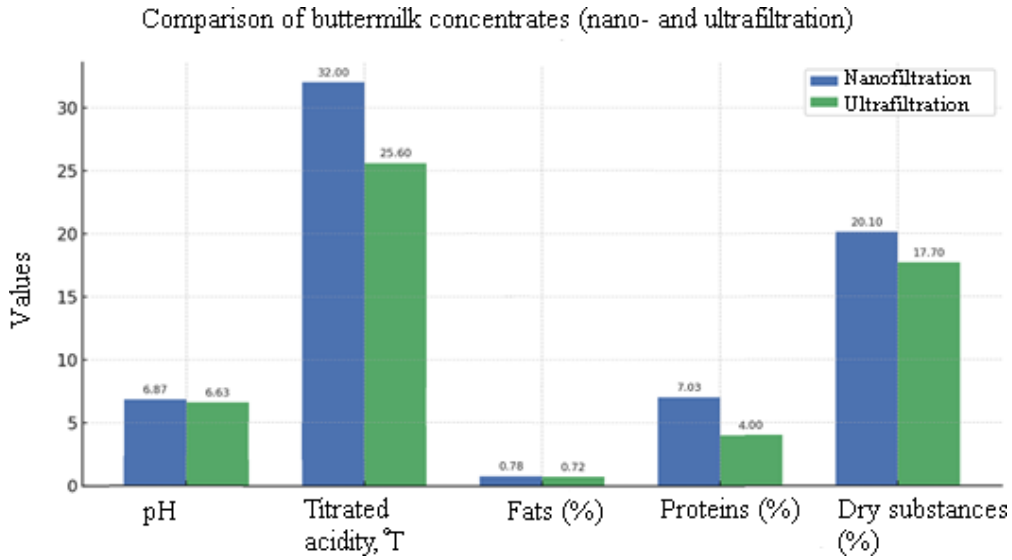


Fig.2 - Comparative characteristics of buttermilk processing methods

Buttermilk concentrates obtained through membrane separation technologies represent valuable ingredients for the food industry. Their composition and functional properties vary depending on the filtration method - whether ultrafiltration or nanofiltration [10]. Given the absence of a specific GOST standard regulating the physicochemical properties of ultrafiltered buttermilk concentrate, a comparative evaluation was carried out based on the existing GOST 34354-2017 «Dairy products. Buttermilk concentrate. Technical specifications» (which pertains to condensed buttermilk), as well as the study by Bobrova, which investigates the characteristics of nanofiltered buttermilk [11].

Figure 2 presents comparative characteristics of buttermilk processing methods.

According to GOST requirements for condensed buttermilk, titratable acidity must not exceed 21 °T. In both membrane-processed samples this level was surpassed: 32.0 ± 1.0 °T in the nanofiltration sample and 25.6 ± 1.0 °T in the ultrafiltration sample. The increase likely reflects active microbial development during concentration or insufficient thermal stabilization of the raw material. Since temperature rises were observed in

both processes, membrane filtration may intensify acidity either through microbiological activity or through concentration effects. Notably, the higher acidity of the nanofiltration sample may accelerate spoilage compared to ultrafiltration.

Fat content in both concentrates remained within the GOST-specified range (0.5–1.5%), amounting to 0.78 ± 0.08% after nanofiltration and 0.72 ± 0.08% after ultrafiltration, confirming effective lipid retention. The slight decrease in the ultrafiltration sample may be linked to the coarser membrane, which can allow finer lipid fractions to pass.

Protein content differed markedly: the nanofiltration concentrate reached 7.03 ± 0.30%, exceeding the normative range (2.5-4.0%), while the ultrafiltered sample contained 4.00 ± 0.20%, close to the upper GOST limit. This distinction highlights the higher selectivity of nanofiltration, which retains both high-molecular proteins and smaller peptides.

According to GOST, the dry matter content of condensed buttermilk should be 30-50% (or above 90% for dried products). In these membrane-concentrated samples, whey removal did not occur; concentration was achieved only by moisture reduction. As a result, dry matter reached 20.10 ± 0.50% after nanofiltration and 17.7 ± 0.50% after ultrafiltration.

Overall, the results show that membrane concentration effectively preserves proteins and fats. Ultrafiltration stands out as a practical and economically advantageous method, providing substantial retention of proteins and dry matter and making it suitable for the production of functional food ingredients, while maintaining lower acidity compared to nanofiltration.

The experiment was conducted with repeated measurements: each temperature condition (20, 30, 40, 50, and 60 °C) was tested in three parallel replicates, allowing for reliable mean values to be obtained and for statistical differences between the conditions to be assessed. Table 2 provides a comparative summary of key physicochemical parameters of buttermilk concentrates produced via different membrane methods, alongside the reference values from GOST 34354–2017 [12].

In the control buttermilk sample, the active acidity was measured at pH 7.14, indicating a mildly alkaline medium. Upon thermal treatment, a gradual decline in pH was observed, most notably in the permeate fraction. At 60 °C, the pH of the permeate decreased to 6.42, suggesting intensified acid-forming reactions. In contrast, the retentate exhibited a narrower pH fluctuation range (from 6.84 to 6.56), likely attributable to its higher protein content, which provides buffering capacity.

Titratable acidity increased with rising temperature, peaking at 40 °C with values of 30 ± 2 °T in the retentate and 27.0 °T in the permeate. A subsequent decline in acidity beyond 50 °C may reflect the thermal inactivation of microbial populations and modifications in the protein–mineral matrix.

The mass fraction of fat in the permeate remained consistently low (0.06–0.1%), confirming the efficiency of membrane separation in removing lipid components from the aqueous phase. Meanwhile, the retentate demonstrated a gradual increase in fat content with temperature elevation – from 0.70 to 0.95% - possibly due to fat globule densification and enhanced retention within the concentrated phase. The most pronounced changes were observed in the distribution of protein between the ultrafiltration fractions. In the permeate, the mass fraction of protein decreased from 1.90% to 1.44% at 40 °C, followed by a slight increase at higher temperatures. In contrast, the retentate maintained a relatively stable protein content, fluctuating between 3.80% and 4.00%, indicating efficient retention of high-molecular-weight compounds.

The mass fraction of dry matter in the permeate showed a steady decline from 5.29% to 4.94%, whereas in the retentate, dry matter content accumulated progressively, ranging from 10.29% to a maximum of 15.38–17.7%. These data underscore the effectiveness of thermal concentration at 30 °C, where the highest dry matter content (17.7%) was recorded, suggesting this temperature regime as the most favorable for obtaining highly concentrated

dairy products.

According to the experimental results presented in Table 2, the maximum protein yield (4%) was achieved at 30 °C. The concentration process was carried out at 30 °C and a pressure of 2.5 MPa. From an initial volume of 500 mL of buttermilk, the process yielded 400 mL of whey and 100 mL of buttermilk concentrate. The total processing time did not exceed 40 minutes.

Taken together, the results demonstrate that temperature treatment exerts a significant influence on the physicochemical characteristics of buttermilk and on the efficiency of membrane fractionation [13]. From the standpoint of optimizing acidity, protein, and fat retention, 30 °C emerged as the most advantageous processing temperature.

The following table presents the physicochemical characteristics of natural cow's milk, goat's milk, and buttermilk.

Table 2 - Physic-chemical parameters of buttermilk concentrate obtained by ultrafiltration

Name of indicators	Buttermilk control	Buttermilk t=20°C		Buttermilk t=30°C		Buttermilk t=40°C		Buttermilk t=50 °C		Buttermilk t=60 °C	
		Permeate(Whey Protein)	Retentate (Clarified Whey)	Permeate (Whey Protein)	Retentate (Clarified Whey)	Permeate (Whey Protein)	Retentate (Clarified Whey)	Permeate (Whey Protein)	Retentate (Clarified Whey)	Permeate (Whey Protein)	Retentate (Clarified Whey)
n=3											
Active acidity, pH	7.14 ± 0.98^{a}	6.84 ± 0.55^{ab}	7.14 ± 0.55^{a}	6,63 ± 0,02^{a}	7,05 ± 0,15^{a}	6.58 ± 0.55^{ab}	6,68 ± 0,14^{ab}	6,73 ± 0,25^{ab}	6,68 ± 0,75^{ab}	6,56 ± 0,85^{b}	6,42 ± 0,95^{b}
Titrated acidity, °T	16 ± 1.2^{a}	16.3 ± 0.55^{a}	22.1 ± 0.5^{b}	25.6 ± 0.4^{c}	23.6 ± 0.22^{b}	26.6 ± 0.48^{c}	27 ± 0.48^{c}	30.2 ± 0.15^{d}	27.1 ± 0.48^{c}	20.66 ± 0.85^{ab}	19.1 ± 0.45^{a}
Mass fraction of fats, %	0.69 ± 0.85^{a}	0.70 ± 0.11^{a}	0.06 ± 0.48^{b}	0.72 ± 0.44^{a}	0.08 ± 0.85^{a}	0.74 ± 1.02^{a}	0.09 ± 0.55^{b}	0.81 ± 0.87^{a}	0.10 ± 0.62^{c}	0.95 ± 0.75^{ab}	0.10 ± 0.62^{b}
Mass fraction of proteins, %	2.89 ± 0.15^{a}	3.94 ± 1.55^{b}	1.90 ± 0.84^{c}	4.00 ± 0.84^{b}	1.82 ± 0.99^{c}	3.90 ± 0.15^{b}	1.44 ± 0.56^{c}	3.98 ± 0.55^{b}	1.79 ± 0.45^{c}	3.80 ± 0.45^{b}	1.76 ± 0.96^{c}
Mass fraction of dry substances, %	10.16 ± 0.64^{a}	10.29 ± 0.95^{a}	5.29 ± 0.44^{b}	17.7 ± 0.44^{c}	5.10 ± 0.78^{b}	16.0 ± 0.35^{c}	4.06 ± 0.85^{b}	16.67 ± 0.42^{c}	5.02 ± 0.71^{b}	15.38 ± 0.16^{c}	4.94 ± 0.17^{b}

The average values in a row marked with different letters (a, b, c) differ from each other statistically at p 0.05. Values with the same letters, as well as combined symbols (ab), do not differ statistically.

Table 3 - Physicochemical characteristics of natural cow's milk, goat's milk, and buttermilk

Name of indicators	Cow's milk	Goat's milk	Buttermilk permeate after ultrafiltration
	n=3		
Active acidity, pH	6,2 ± 0,12	7,01 ± 0,11	6,63 ± 0,02
Titrated acidity, °T	16 ± 0,03	17 ± 0,01	25,6 ± 0,04
Mass fraction of fats, %	3,98 ± 0,59	4,5 ± 0,01	0,72 ± 0,45
Mass fraction of proteins, %	3,47 ± 0,12	3,1 ± 0,15	4,00 ± 0,85
Mass fraction of dry substances, %	10,56 ± 0,55	11,85 ± 0,78	17,7 ± 0,44

As shown in Table 3, cow's milk is characterized by moderate acidity, a fat content of about 3.98%, and a protein level of 3.47%, which are within the standard range for natural cow's milk. Goat's milk shows a slightly higher pH and fat content (4.5%), consistent with its naturally richer composition. The parameters of both types of milk meet standard physicochemical requirements. The buttermilk permeate obtained after ultrafiltration demonstrates lower fat and higher protein and dry matter contents, reflecting the concentration effect of the membrane process.

Table 4 - Evaluation of organoleptic parameters of buttermilk concentrates obtained by ultrafiltration, score

	Characteristics of organoleptic parameters	Score
Taste	Milky, clean, moderately sweet taste with a hint of pasteurization	5
	Unexpressed milky, moderately sweet	4
	Empty	3
	The intrusive sweet taste	2
	Uncharacteristic for this product	1
Consistency	Homogeneous, fluid, slightly viscous liquid without sediment and flakes	5
	Homogeneous liquid	4
	Excessively liquid or excessively viscous	3
	Heterogeneous, with a visible protein deposit	2
	Heterogeneous, floccose, stringy	1

The buttermilk obtained through ultrafiltration underwent a comprehensive organoleptic evaluation. Sensory attributes often exert a more profound influence on consumer preferences than the chemical composition or nutritional value of a product, ultimately shaping market demand [14].

This underscores the critical importance of in-depth sensory analysis at every stage of production.

In the case of fermented dairy products with a complex raw material matrix, the development of their sensory profile is largely dictated by the quality of the initial dairy base [15]. Among the various parameters that define its consumer appeal, taste, aroma, and texture stand out as the most pivotal. To quantify these attributes, a tailored scoring system was devised specifically for buttermilk concentrates in the Table 4.

The organoleptic evaluation revealed that the buttermilk concentrates obtained via ultrafiltration, containing between 10% and 17.7% total solids, exhibited a clean, pleasant flavor profile with a subtly sweet undertone. Notably, the intensity of flavor increased proportionally with the degree of concentration. Sensory attributes were assessed using a five-point scale. The results of the organoleptic analysis of buttermilk are presented in Table 5.

Table 5 - Results of organoleptic analysis of buttermilk

Indicators	Buttermilk, 10.29% TS	Buttermilk, 10,16 TS	Buttermilk, 10,29 TS	Buttermilk, 16 TS	Buttermilk, 16,67 TS	Buttermilk, 15,38 TS	Buttermilk, 17,7 TS
n=7							
Taste	4,5±0,12	4,2± 0,14	4,21±0,04	4,32±0,02	4,11±0,05	4,32±0,01	4,9±0,02
Consistency	4,12±0,02	4,23±0,05	4,20±0,05	4,32±0,07	4,74±0,04	4,8±0,01	4,9±0,01

Based on the data in the table, the best sensory results were obtained for the buttermilk sample with 17.7% total solids. This variant received the highest scores for both taste and consistency, indicating a richer flavor and a more stable, pleasant texture. The increased amount of total solids likely improves the product's structure, making it more balanced and more appealing in terms of sensory characteristics compared to the other samples.

Based on a comprehensive series of analyses, the ultrafiltered buttermilk concentrate with a 17.7% solids content was selected as the optimal base for the development of fermented dairy products enriched with high-quality protein.

Numerous studies [16] have demonstrated that the rheological behavior and syneresis of fermented milk gels are significantly influenced by the dispersion characteristics of protein particles in the starting material. In this context, investigating the transformations in the structural viscosity of buttermilk - driven by its protein components under the effect of ultrafiltration – as well as the nature of the resulting protein microstructures, presents both scientific and practical value [17].

As a dairy base meeting the defined requirements, the buttermilk concentrate obtained through ultrafiltration proved to be the most suitable candidate. Its compositional characteristics suggest it offers a favorable environment for the growth of starter cultures, including probiotic strains. Moreover, the incorporation of whey concentrate into the dairy matrix is expected to substantially enhance the content of high-quality whey proteins in the final product [18].

To develop technology for protein-enriched fermented dairy products, a tailored multicomponent

mixture was formulated using skimmed cow's milk, goat's milk, and buttermilk concentrate. Building on earlier studies that explored the optimal ratio of cow's to goat's milk, it was established that a 50:50 blend yielded the best functional and sensory balance. However, a higher proportion of goat's milk significantly increases production costs.

With this in mind, the current study sought to refine the formulation by systematically reducing the goat's milk content while compensating with increased levels of buttermilk concentrate. Four experimental formulations of the dairy base were prepared using the following proportions of cow's milk / goat's milk / buttermilk concentrate:

Variant 1: 50/40/10

Variant 2: 50/30/20

Variant 3: 50/20/30

Variant 4: 50/10/40

Each variant underwent detailed physicochemical analysis under laboratory conditions using standard methodologies. The resulting data are presented in Table 6.

Table 6 - Physic-chemical parameters of a multicomponent mixture using buttermilk concentrate

Variant	Milk mixture ratio (cow/goat/buttermilk, %)	Dry substance, % by mass (n=3)	Proteins, g/100 g (n=3)	Fats, g/100 g (n=3)
1	50/40/10	18.25±0,15	6.01±0,02	3.65±0,56
2	50/30/20	24.00±0,18	8.67±0,45	3.40±0,45
3	50/20/30	29.75±0,65	11.33±1,20	3.15±0,15
4	50/10/40	35.50±0,95	14.00±0,42	2.90±0,78

The results of the conducted study demonstrate a clear upward trend in both total solids and protein content as the proportion of buttermilk concentrate in the dairy base increases – from Variant 1 (10% concentrate) to Variant 4 (40%). Specifically, the total solids content rose from 18.25% to 35.50%, while protein levels increased from 6.01% to 14.00%. These findings underscore the beneficial role of buttermilk concentrate in enhancing the density, nutritional richness, and biological value of the final product.

It has been confirmed that buttermilk concentrate serves as a valuable source of high-quality protein, making it a promising ingredient in the formulation of functional food products.

Conclusion. Thus, the incorporation of buttermilk concentrates into a dairy blend containing cow's and goat's milk facilitates a simultaneous increase in complete protein content and a reduction in fat, offering a significant advantage in the development of functional and dietetic dairy products.

Moreover, it was found that increasing the proportion of buttermilk concentrate in the formulation leads to a marked rise in total solids and a notable improvement in sensory characteristics – such as taste, aroma, and texture. Owing to its finely dispersed protein composition and high biological value, buttermilk concentrate contributes to the formation of an optimal gel structure in fermented dairy matrices and creates a favorable environment for the growth of starter cultures, including probiotic microorganisms.

Funding. This research was carried out within the framework of the targeted scientific and technical program IRN BR24892775, entitled «Development of Technology for the Integrated and Advanced Processing of Agricultural Raw Materials for the Production of High-Quality and Safe Food Products».

Литература

1. Claire C., Timlin M., Hogan S. A., Murphy E. G., O'Callaghan T. F., Brodkorb A., Hennessy D., Fitzpatrick E., O' Donavan M., McCarthy K., Murphy J. P., Yin X., Brennan L. Impact of Dietary Regime on the Metabolomic Profile of Bovine Buttermilk and Whole Milk Powder// Metabolomics. - 2024. - Vol.20(5): 93. DOI 10.1007/s11306-024-02157-4.

2. Санакоева А.Г., Маргиева Ф.Т. Разработка технологии кисломолочного напитка на основе концентрата пахты с сиропом облепихи// Достижения науки - сельскому хозяйству. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Владикавказ. - 2017. -Т.II. -С. 238-241.

3. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ 53359-2009. Молоко и продукты переработки молока. Метод определения pH. // Москва: Стандартинформ. - 2009. -11 с. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293828/4293828079.pdf. -Дата обращения: 11.07.2025.

4. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ 3624-92. Молоко и молочные продукты. Метод определения титруемой кислотности. //Москва: Издательство стандартов. - 1992. -8 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data/100/10071.pdf. -Дата обращения: 11.07.2025.

5. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ 3626-73. Молоко и молочные продукты. Методы определения влаги и сухого вещества // Межгосударственный стандарт. -Москва: Издательство стандартов. -1974. -10 с. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/36972. -Дата обращения: 11.07.2025.

6. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р ИСО 22935-2-2011. Молоко и молочные продукты. Органолептический анализ. Часть 2. Рекомендуемые методы органолептической оценки // Межгосударственный стандарт. – Москва: Стандартинформю -2012. -19 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293796/4293796164.pdf. -Дата обращения: 11.07.2025.

7. Острецова Н. Г., Боброва А. В. Использование нанофильтрационных концентратов пахты и сыворотки для кисломолочных продуктов с повышенной массовой долей белка // Food systems. - 2021. - Т.4 (2). - С.134-143. DOI 10.21323/2618-9771-2020-4-2-134-143.

8. Скокова О. И., Чеканова Ю. Ю., Мелех Т. В. Исследование влияния пахты в составе комбинированной сливочной смеси на стойкость и стабильность свойств сметаны при хранении // Сборник научных трудов «Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья». -2021. -Т.1 (15). -С. 136-145. DOI 10.47612/2220-8755-2020-15-136-145.

9. Зобкова З. С., Харитонов Д. В., Фурсова Т. П., Зенина Д. В., Гаврилина А. Д., Шелагинова И. Р., Шефов Д. А. Влияние состава белковой фазы кисломолочных продуктов на их реологические свойства // Переработка молока. - 2014. - №10 (180). - С.50-51.

10. Ali A.H. Current knowledge of buttermilk: Composition, applications in the food industry, nutritional and beneficial health characteristics // International Journal of Dairy Technology. -2018. -Vol.72(2). -P. 169-182. DOI 10.1111/1471-0307.12572.

11. Krebs L., Bérubé A., Iung J., Marciniak A., Turgeon S.L., Brisson G. Impact of Ultra-High-Pressure Homogenization of Buttermilk for the Production of Yogurt//Foods. -2021. -Vol.10(8):1757. DOI 10.3390/foods10081757.

12. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ 34354-2017. Іркіт и напитки на её основе//Москва: Стандартинформ. -2017. -19 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293740/4293740472.pdf. - Дата обращения: 11.07.2025.

13. Кручинин А. Г., Агаркова Е. Ю. Использование мембранных технологий при концентрировании вторичного молочного сырья // Переработка молока. - 2017. - № 12 (218). -С.54–55.

14. Kumar R., Kaur M., Garsa A.K., Shrivastava B., Reddy V.P., Tyagi A. Natural and cultured buttermilk //Fermented Milk and Dairy Products. -2015. -P.203–225. ISBN 9781466577978.

15. Buey B., Bellés A., Abad I., Vergara C., Mesonero J.E., Sánchez L., Grasa L., et al. Comparative effect of bovine buttermilk, whey, and lactoferrin on the innate immunity receptors and oxidative status of intestinal epithelial cells // National Library of Medicine. -2021. -Vol.99(1). -P.54-60. DOI 10.1139/bcb-2020-0121.

16. Ahmad N., Manzoor M.F., Shabbir U., Ahmed S., Ismail T., Saeed F., Nisa M., Anjum F.M., Hussain S. Health lipid indices and physicochemical properties of dual fortified yogurt with extruded flaxseed omega fatty acids and fibers for hypercholesterolemic subjects // Food Science & Nutrition. -2019. -Vol.8(1). -P.273-280. DOI 10.1002/fsn3.1302.

17. Barukčić I., Lisak Jakopović K., Božanić R. Valorisation of whey and buttermilk for production of functional beverages: an overview of current possibilities // Food Technology and Biotechnology. -2019. -Vol.57(4). -P.448-460. DOI 10.17113/ftb.57.04.19.6460.

18. Абделлатыф С.С., Тихомирова Н. А. Пахта: один из источников молочных минорных компонентов // Пищевые ингредиенты России 2019: материалы конференции. -2019. -С.6-9.

References

1. Claire C., Timlin M., Hogan S. A., Murphy E. G., O'Callaghan T. F., Brodkorb A., Hennessy D., Fitzpatrick E., O' Donavan M., McCarthy K., Murphy J. P., Yin X., Brennan L. Impact of Dietary Regime on the Metabolomic Profile of Bovine Buttermilk and Whole Milk Powder// Metabolomics. -2024. -Vol.20(5): 93. DOI 10.1007/s11306-024-02157-4.

2. Sanakoeva A.G., Margieva F.T. Razrabotka tekhnologii kislomolochnogo napitka na osnove kontsentrata pakhty s siropom oblepikhi // Dostizheniya nauki - sel' skomu khozyaystvu. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Vladikavkaz. -2017. -T. II. -S.238-241. [in Russian]

3. Nacional' nyj standart Rossijskoj Federacii. GOST 53359-2009. Moloko i produkty pererabotki moloka. Metod opredelenija pH.//Moskva: Standartinform. -2009. -11 s. URL: https://rosgosts.ru/file/gost/67/100/gost_r_53359-2009.pdf. -Date of access: 11.07.2025. [in Russian]

4. Gosudarstvennyj standart Rossijskoj Federacii. GOST 3624-92. Moloko i molochnye produkty. Metod opredelenija titruemoj kislotnosti. //Moskva: Izdatel' stvo standartov. -1992. -8 s. URL: https://files.stroyinf.ru/Data/100/10071.pdf. -Date of access: 11.07.2025. [in Russian]

5. Gosudarstvennyj standart Rossijskoj Federacii. GOST 3626-73. Moloko i molochnye produkty. Metody opredelenija vlagi i suhogo veshhestva // Mezhgosudarstvennyj standart. -Moskva: Izdatel' stvo standartov. - 1974. - 10 s. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/36972. -Date of access: 11.07.2025. [in Russian]

6. Gosudarstvennyy standart Rossiyskoy Federatsii. GOST R ISO 22935-2-2011. Moloko i molochnye produkty. Organolepticheskiy analiz. Chast' 2. Rekomenduemye metody organolepticheskoy otsenki // Mezhgosudarstvennyy standart. – Moskva: Standartinform. -2012. -19 s. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293796/4293796164.pdf. -Date of access: 11.07.2025. [in Russian]

7. Ostrecova N. G., Bobrova A. V. Ispol' zovanie nanofil' tracionnyh koncentratov pahty i syvorotki dlja kislomolochnyh produktov s povyshennoj massovoj dolej belka // Food systems. - 2021. - T.4 (2). - S.134–143. DOI 10.21323/2618-9771-2020-4-2-134-143. [in Russian]

8. Skokova O. I., Chekanova Ju. Ju., Trilinskaja E. A., Avtushenko V. V., Meleh T. V. Issledovanie vlijanija pahty v sostave kombinirovannoj slivochnoj smesi na stojkost' i stabil' nost' svojstv smetany pri

hranenii//Sbornik nauchnyh trudov «Aktual' nye voprosy pererabotki mjasnogo i molochnogo syr' ja». -2021. -T. 15. - S.136-145. DOI 10.47612/2220-8755-2020-15-136-145. [in Russian]

9. Zobkova Z. S., Haritonov D. V., Fursova T. P., Zenina D. V., Gavrilina A. D., Shelaginova I. R., Shefov D. A. Vlijanie sostava belkovoj fazy kislomolochnyh produktov na ih reologicheskie svojstva // Pererabotka moloka. - 2014. - № 10. - S.50–51.

10. Ali A.H. Current knowledge of buttermilk: Composition, applications in the food industry, nutritional and beneficial health characteristics // International Journal of Dairy Technology. -2019. -Vol.72(2). -P. 169-182. DOI 10.1111/1471-0307.12572.

11. Krebs L., Bérubé A., Iung J., Marciniak A., Turgeon S.L., Brisson G. Impact of Ultra-High-Pressure Homogenization of Buttermilk for the Production of Yogurt//Foods. -2021. -Vol.10(8):1757. DOI 10.3390/foods10081757.

12. Nacional' nyj standart Rossijskoj Federacii. GOST 34354-2017. Pahta i napitki na ejo osnove. // Moskva: Standartinform. -2017. -19 c. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293740/4293740472.pdf. -Date of access: 11.07.2025. [in Russian]

13. Kruchinin A. G., Agarkova E. Ju. Ispol' zovanie membrannyh tehnologij pri koncentrirovanii vtorichnogo molochnogo syr' ja // Pererabotka moloka. - 2017. - № 12. - S. 54-55. [in Russian]

14. Kumar R., Kaur M., Garsa A.K., Shrivastava B., Reddy V.P., Tyagi A. Natural and cultured buttermilk //Fermented Milk and Dairy Products. -2015. -P.203–225. ISBN 9781466577978.

15. Buey B., Bellés A., Abad I., Vergara C., Mesonero J.E., Sánchez L., Grasa L., et al. Comparative effect of bovine buttermilk, whey, and lactoferrin on the innate immunity receptors and oxidative status of intestinal epithelial cells // National Library of Medicine. -2021. -Vol.99(1). -P.54–60. DOI 10.1139/bcb-2020-0121.

16. Ahmad N., Manzoor M.F., Shabbir U., Ahmed S., Ismail T., Saeed F., Nisa M., Anjum F.M., Hussain S. Health lipid indices and physicochemical properties of dual fortified yogurt with extruded flaxseed omega fatty acids and fibers for hypercholesterolemic subjects // Food Science & Nutrition. -2020. -Vol.8(1). -P.273-280. DOI 10.1002/fsn3.1302.

17. Barukčić I., Lisak Jakopović K., Božanić R. Valorisation of whey and buttermilk for production of functional beverages: an overview of current possibilities // Food Technology and Biotechnology. -2019. -Vol. 57(4). -P.448-460. DOI 10.17113/ftb.57.04.19.6396.

18. Abdellatyf S.S., Tihomirova N. A. Pahta: odin iz istochnikov molochnyh minornyh komponentov // Pishhevye ingredienty Rossii 2019: materialy konferencii. -2019. -S.6-9. [in Russian]

Information about authors

Tultabaeva T.Ch. - Doctor of Technical Sciences, Professor, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: tamara_tch@list.ru;

Zhakupova G.N. - Candidate of Technical Sciences, Professor, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: gulmira-zhak@mail.ru;

Makangali K.K.- PhD, Associate Professor, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: k.makangali@mail.ru;

Sagandyk A.T. - PhD, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: assema.bukeyeva@gmail.com;

Muldasheva A.H. - Master of Technical Sciences, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: aknurmuldasheva@gmail.com;

Dairova K.Sh - Master's student, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: dairova111@mail.ru.

Сведения об авторах

Тултабаева Т.Ч. - д.т.н. профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан, e-mail: tamara_tch@list.ru;

Жакупова Г.Н. - к.т.н., профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан, e-mail: gulmira-zhak@mail.ru;

Макангали К.К.- доктор PhD, ассоциированный профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан, e-mail: k.makangali@mail.ru;

Сагандык А.Т. - доктор PhD, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан, e-mail: assema.bukeyeva@gmail.com;

Мулдашева А.Х. - магистр технических наук, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан, e-mail: aknurmuldasheva@gmail.com;

Даирова К.Ш. - магистрант, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан, e-mail: dairova111@mail.ru.

ҒТАМР 65.63.33 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1094**

KF ҰЙЫТҚЫ ДАҚЫЛЫМЕН ӘРТҮРЛІ СҮТ ТҮРЛЕРІНІҢ АШУ ПРОЦЕСІН ЗЕРТТЕУ

А.Ж. Оразов✉, Б.Ж. Рыскалиева, А.А. Сармалаев, А.М. Меркенова

Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан

✉ *Корреспондент-автор: orazov_ayan@mail.ru*

Мақалада сиыр, ешкі және түйе сүттерін KF ұйытқы дақылымен ашыту процесіне салыстырмалы талдау жасалды. Зерттеу барысында әртүрлі сүт шикізатынан дайындалған айран үлгілерінің органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері, сондай-ақ титрленетін және белсенді қышқылдық динамикасы зерттелді. Алынған нәтижелер бойынша KF ұйытқысы барлық сүт түрлерінде сүт қышқылы бактериялары мен ашытқылардың белсенді дамуын қамтамасыз етіп, өнімнің 90-120°Т қышқылдық деңгейіне жетуіне мүмкіндік берді. Алайда, ашыту процесінің ұзақтығы шикізат түріне тікелей байланысты екені анықталды: сиыр және ешкі сүті үшін ашу уақыты 4-5 сағатты құраса, түйе сүтінде бұл процесс 8 сағатқа дейін созылды. Бұл кешеуілдеу түйе сүтінің құрамындағы ақуыздар мен майлардың жоғары мөлшерімен және оның биохимиялық ерекшеліктерімен түсіндіріледі. Зерттеу қорытындысы бойынша KF ұйытқы дақылы функционалдық қасиеттері бар сүт өнімдерін өндіруде тиімді деп табылды, әрі түйе сүтінен өнім алу үшін технологиялық режимді бейімдеу қажеттілігі негізделді.

Түйін сөздер: ашыту, сүт, айран, ұйытқы, қышқылдық, құрылым.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФЕРМЕНТАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МОЛОКА ЗАКВАСОЧНОЙ КУЛЬТУРОЙ KF

А.Ж. Оразов✉, Б.Ж. Рыскалиева, А.А. Сармалаев, А.М. Меркенова

Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, Уральск, Казахстан, e-mail: orazov_ayan@mail.ru

В статье представлены результаты сравнительного анализа процесса ферментации коровьего, козьего и верблюжьего молока с использованием заквасочной культуры KF. Целью работы являлась оценка возможности использования различных видов молочного сырья для производства кисломолочного продукта (айрана) и изучение качественных характеристик полученных образцов. В ходе исследования были изучены органолептические и физико-химические показатели, а также динамика титруемой и активной кислотности. Установлено, что применение культуры KF обеспечивает активное развитие молочнокислых бактерий и дрожжей во всех образцах, способствуя формированию устойчивой консистенции, специфического вкуса и аромата. Кислотность готовых продуктов варьировала в пределах 90-120 °Т. Выявлено, что продолжительность процесса сквашивания существенно зависит от вида сырья: ферментация коровьего и козьего молока завершалась за 4-5 часов, тогда как сквашивание верблюжьего молока длилось до 8 часов. Данная особенность обусловлена высоким содержанием белков и жиров, а также специфическим биохимическим составом верблюжьего молока. Результаты исследования подтверждают эффективность использования закваски KF для разработки технологии функциональных кисломолочных продуктов, однако указывают на необходимость адаптации временных режимов для верблюжьего молока.

Ключевые слова: ферментация, молоко, айран, закваска, кислотность, структура.

INVESTIGATION OF THE FERMENTATION PROCESS OF VARIOUS TYPES OF MILK WITH STARTER CULTURE KF

A.Zh. Orazov✉, B.Zh. Ryskaliyeva, A.A. Sarmalaev, A.M. Merkenova

Zhangir khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University, Uralsk, Kazakhstan,
e-mail: orazov_ayan@mail.ru

This article investigates the influence of the fermentation process on various types of milk (cow, goat, and camel) using the KF starter culture. The study evaluates the feasibility of using these milk types to produce a fermented milk product (ayran) and analyzes the organoleptic and physico-chemical parameters of the resulting samples. By observing the dynamics of titratable and active acidity, the optimal fermentation regime for this starter culture was determined. The results indicate that the acidity of the products made from cow, goat, and camel milk ranged from 90 to 120 °T. It was observed that the product made from camel milk possessed lower acidity and differed significantly in taste and texture. The application of the KF starter culture ensured the active development of lactic acid bacteria and yeast, contributing to the formation of a stable consistency, distinct taste, and aroma. The duration of the fermentation process varied depending on the raw material: while cow and goat milk required 4–5 hours, the fermentation of camel milk lasted up to 8 hours. This delay is attributed to the relatively high protein and fat content and the specific biochemical composition of camel milk. The study concludes that the KF starter culture is effective for the production of fermented milk products with improved functional properties, though specific adjustments to the fermentation time are required for camel milk.

Keywords: fermentation, milk, ayran, starter culture, acidity, structure.

Кіріспе. Ашымалы сүт өнімдерінің диеталық қасиеттері асқазан мен ішек жолдары белсенділігіне әсер етеді, нәтижесінде ас қорыту жолдары тағамның қорытылуын тездететін ферменттерді қарқынды шығарады. Жағымды, сәл сергітетін және өткір дәмі бар ашымалы сүт өнімдері тәбетті ашады, ас қорыту жолдарының белсенділігін арттырады, осылайша ағзаның жалпы жағдайын жақсартады. Сүт өнімдерінде кездесетін микроорганизмдер тобы, ферментациялық процестерге қатысып, лактозаны сүт қышқылына айналдырады. Бұл бактериялар, негізінен, *Lactobacillus, Bifidobacterium, Streptococcus* және *Lactococcus* тектес микроорганизмдер қатарына кіреді және олардың адам ағзасына пайдалы әсерлері бар [1]. Сүт қышқылды бактериялардың (СҚБ) маңызды қасиеттерінің бірі — олар ас қорыту жүйесін сақтай отырып, микрофлораны қалыпқа келтіреді, яғни пайдалы бактериялардың көбеюіне ықпал етеді және зиянды микроағзалардың өсуін тежейді. Сонымен қатар, СҚБ-лар иммундық жүйенің күштілігін арттыруға, ішек микрофлорасының балансын сақтауға, ас қорытуды жақсартуға және тағамның қоректік құндылығын арттыруға көмектеседі [2].

Сиыр сүті ақуыздардың, майлардың және көмірсулардың теңдестірілген құрамына байланысты сүт өнеркәсібінде ең көп таралған шикізат түрі болып табылады. Оның құрамында барлық қажетті қоректік заттар бар және ол адам ағзасы үшін өте маңызды тағамдардың бірі. Сүттің ақуыздары негізінен казеин мен сарысу ақуыздарынан тұрады, олар ағзаның өсуі мен қалпына келуі үшін қажет аминқышқылдарына бай [3].

Ешкі сүті өзінің жоғары сіңімділік қасиеттерінің арқасында сиыр сүтіне қарағанда адам ағзасы үшін анағұрлым қолайлы болып табылады, бұл оны ас қорыту жүйесі бұзылған адамдар үшін тиімді тағамдық ресурс ретінде қарастыруға мүмкіндік береді [4,5]. Статистикалық деректерге сәйкес, ешкі сүтінің әлемдік тұтыну көлемі сиыр сүтінен кейінгі екінші орынды иеленеді [6]. Құрамы мен функционалдық қасиеттері бойынша ешкі сүтінен алынатын өнімдер сиыр сүтінен өндірілетін өнімдерге балама ретінде жоғары технологиялық және тағамдық маңыздылыққа ие. Осыған байланысты ешкі сүтін қолдана отырып, емдік-профилактикалық бағыттағы ашытылған сүт өнімдерінің технологиясын әзірлеу қазіргі заманғы сүт өнімдерін өндіру саласындағы өзекті ғылыми-зерттеу және практикалық міндеттердің бірі болып саналады [7,8].

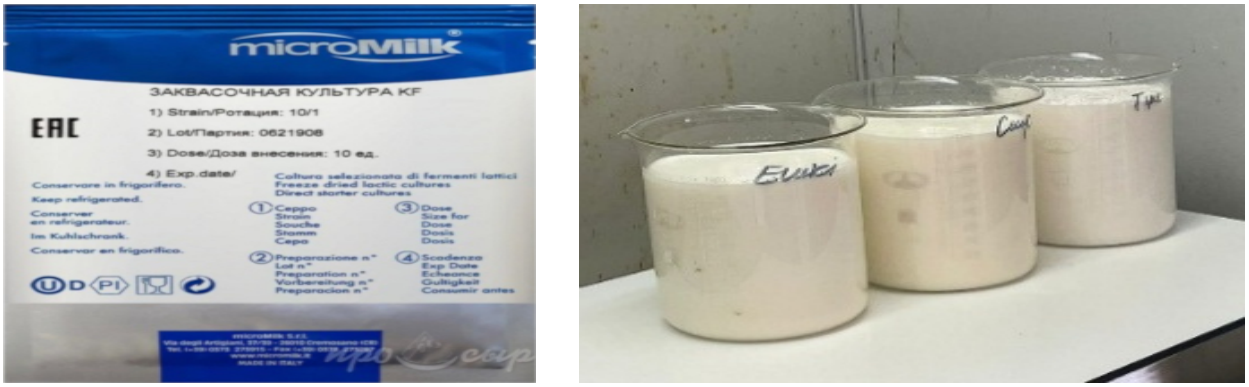
Елімізде сиыр және ешкі сүттерімен қатар балама ретінде түйе сүтінен алынатын өнімдер кеңінен тұтынылады. Бұл өнімдерге сұраныс

әсіресе Орталық Азия, Африка және Таяу Шығыс елдерінің тұрғындары арасында климаттық ерекшеліктеріне байланысты жоғары. Ол тағамдық және биологиялық құндылығы тұрғысынан, шөлейт және аридті климаттық белдеулерде өмір сүретін халықтар үшін маңызды ақуыз көзі болып табылады. Тарихи тұрғыда бұл өнім дәстүрлі мал шаруашылығымен айналысатын этникалық топтардың күнделікті рационының ажырамас бөлігіне айналған. Түйе сүті құрамында жоғары сапалы ақуыздармен қатар, иммуноглобулиндер, лактоферрин, темір, мырыш, С дәрумені сияқты биологиялық белсенді заттардың болуына байланысты, оны тек тағамдық емес, сонымен қатар профилактикалық және терапиялық мақсатта қолдану әлеуеті артып келеді [9,10]. Ф. Бенмезиан-Дерраджи жүргізген зерттеулерге сәйкес, сүт өнімдерінің сапасын арттыруда түйе сүтіне ерекше назар аударады, себебі оның құрамында канцерогендерге қарсы және иммуностимуляторлық қасиеттерге ие биобелсенді компоненттер – антиоксиданттар мен лактоферриннің жоғары мөлшері анықталған. Бұл заттар адам ағзасын патогенді бактериялар мен вирустардың әсерінен қорғауда маңызды рөл атқарады, сондай-ақ жалпы иммундық жүйенің қызметін күшейтуге ықпал етеді. [11,12].

Сиыр, ешкі және түйе шаруашылығынан алынатын өнімдерді тұтыну – еліміздің аграрлық секторындағы маңызды құрылымдық элементтердің бірі болып табылады. Бұл жануарлардан өндірілетін сүт пен сүт өнімдері халықтың дәстүрлі азық-түлік тұтыну рационында маңызды орынға ие болып, агроөнеркәсіптік кешеннің тұрақты және тиімді дамуына оң ықпал етеді [13].

Материалдар мен әдістер. Зерттеу жұмысы Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университетінің Сынау орталығы зертханасында орындалды.

Зерттеу нысаны ретінде Қазақстан Республикасының қолданыстағы стандарттарына (ҚР СТ 1760-2008, ҚР СТ 32259-2013, ҚР СТ 166-2015) сәйкес келетін сиыр, ешкі және түйе сүттері пайдаланылды. Ашыту процесі үшін Micromilk өндірушісінің KF көпкомпонентті ұйытқы дақылы қолданылды. Аталған ұйытқының құрамына *Streptococcus thermophilus, Lactococcus lactis, Lactococcus cremoris, Leuconostoc mesenteroides subsp. cremoris, Lactococcus lactis biovar diacetylactis* сияқты сүт қышқылды бактериялар мен арнайы ашытқылар кіреді.



1 - сурет. Зерттеу нысандары

Айран өндіру технологиясы бойынша сүт үлгілеріне 10:1 қатынасында ұйытқы қосылып, олар келесідей топтастырылды:

№1 үлгі - сиыр сүті негізіндегі айран;

№2 үлгі - ешкі сүті негізіндегі айран;

№3 үлгі - түйе сүті негізіндегі айран.

Үлгілерді ашыту процесі 33±2 °С температурада, өнімнің титрленетін қышқылдығы 90-120 °Т көрсеткішіне жеткенге дейін (шамамен 8 сағат аралығында) жүргізілді.

Зерттеу барысында стандартталған келесі талдау әдістері қолданылды:

Органолептикалық бағалау: ГОСТ ИСО 22935-2-2011 бойынша сыртқы түрі, консистенциясы, дәмі мен иісі анықталды.

Физика-химиялық көрсеткіштер: майдың массалық үлесі (ГОСТ 5867-90), ақуыз мөлшері (ГОСТ 25179-90) және лактоза үлесі (ГОСТ 34304-2017) мемлекетаралық стандарттар негізінде есептелді.

Қышқылдық динамикасы: Титрленетін қышқылдық титриметриялық әдіспен (ГОСТ 3624-92), ал белсенді қышқылдық (pH) pH-150МИ қондырғысында потенциометриялық әдіспен анықталды.

Нәтижелер мен талқылау. Зерттеу барысында сиыр, ешкі және түйе сүтінен KF ұйытқысымен алынған айран үлгілерінің сапалық сипаттамаларын жан-жақты бағалау мақсатында олардың органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштеріне талдау жасалды. Органолептикалық бағалау кезінде өнімдердің сыртқы түрі, иісі, дәмі мен консистенциясы сараланды. Физика-химиялық параметрлер ретінде майдың, ақуыздың массалық үлестері, құрғақ заттар мөлшері мен лактоза деңгейі анықталды (кесте 1).

1-кестеде көрсетілгендей, сүттің әр түрінен алынған үлгілердің құрамында айтарлықтай айырмашылықтар байқалды. Бұл айырмашылықтар тек жануарлардың түріне ғана емес, сонымен қатар олардың азықтандыру рационына, лактация кезеңіне және шикізатты технологиялық өңдеу ерекшеліктеріне тікелей байланысты.

Зерттеу барысында анықталғандай, сиыр және ешкі сүтінен жасалған айрандар стандартты органолептикалық талаптарға толық сәйкес келсе, түйе сүтінен алынған үлгінің консистенциясы өзіндік биологиялық құрылымына (ақуыз және май фракцияларының ерекшелігі) байланысты сұйықтау әрі өзіне тән ерекше дәмге ие болды. Бұл нәтижелер түйе сүтін ашыту кезінде технологиялық режимдерді (уақыт пен температураны) жекелей бейімдеу қажеттігін негіздейді.

Органолептикалық бағалау нәтижелері үш үлгідегі сүттің түсі, иісі, дәмі және консистенциясы белгіленген стандарттарға сәйкес келетінін көрсетті. Үлгілер біртектілігімен және жағымды дәмдік қасиеттерімен ерекшеленді, бұл олардың тұтынушылық тартымдылығын растайды [14,15].

Ақуыз бен майдың массалық үлесі өнімнің энергетикалық құндылығы мен құрылым түзілуіне тікелей әсер етеді. Зерттеу нәтижесінде №2 үлгіде (ешкі сүті) лактоза мөлшерінің жоғары болуы (5,26%) анықталды, бұл ашыту процесінің қарқынды жүруіне қолайлы жағдай жасайды. Түйе сүтінде (№3 үлгі) ақуыз (3,75%) мен май (4,88%) мөлшерінің жоғары болуы оның тағамдық құндылығын арттырады. Алайда, түйе сүтіндегі ақуыз және құрғақ заттар (10,05%) мөлшерінің стандартты талаптардан төмен болуы өнімнің консистенциясына өзіндік әсерін тигізді.

Түйе сүтінің ашыту процесінің 8 сағатқа дейін созылуы оның биохимиялық ерекшеліктерімен түсіндіріледі. Түйе сүтіндегі казеин фракцияларының құрылымы (әсіресе β-казеиннің жоғары үлесі және к-казеиннің аздығы) мен мицеллалардың үлкен мөлшері тығыз ұйытындының (ұйытқының) кеш түзілуіне себеп болады. Сондай-ақ, түйе сүтінің құрамындағы лактоферрин мен иммуноглобулиндер сияқты табиғи антимикробтық заттардың жоғары концентрациясы ашыту бактерияларының белсенділігін тежеп, қышқылдықтың баяу көтерілуіне ықпал етеді. Бұл факторлар түйе сүтінен айран алу кезінде технологиялық процесті (ашыту уақытын ұзарту немесе температураны оңтайландыру) түзетуді талап етеді.

Ашыту процесі 8 сағат бойы бақыланды. Қышқыл түзілу динамикасын зерттеу мақсатында сынамалар әр сағат сайын алынып отырды. Барлық үлгілерде pH мәнінің төмендеуі және титрленетін қышқылдықтың артуы байқалды, бұл KF ұйытқысының сүт ортасына бейімделіп, лактозаны сүт қышқылына айналдыру процесінің жүріп жатқанын дәлелдейді [16].

1 - кесте. Сиыр, ешкі және түйе сүттерінің органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері

Көрсеткіштер		Сипаттамасы және нормасы	Зерттеу нәтижелері
Сиыр сүті ҚР СТ 1760-2008	Дәмі мен иісі	Таза, балғын табиғи сүтке тән емес бөгде иістер мен дәмдерсіз	Сәйкес
	Консиситенциясы	Біртекті, шөгіндісіз	Сәйкес
	Түсі	Ақтан сәл сарыға дейін	Сәйкес
	Майдың массалық үлесі, %, кем емес	3,2	4,06±0,001
	Ақуыздың массалық үлесі, %, кем емес	2,8	3,23±0,003
	Құрғақ заттар, %*	-	8,95±0,001
	Лактоза, %*	-	3,41±0,002
Ешкі сүті ГОСТ 32259-2013	Дәмі мен иісі	Ерекше ешкі сүтінің дәмі, ешкі сүтіне тән иіс	Сәйкес
	Консиситенциясы	Сұйық әрі біркелкі	Сәйкес
	Түсі	Ақ немесе ақшыл-сары	Сәйкес
	Майдың массалық үлесі, %	2,8-5,6	5,01±0,002
	Ақуыздың массалық үлесі, %, кем емес	3,0	3,50±0,001
	Құрғақ заттар, %*	-	9,59±0,001
	Лактоза, %*	-	5,26±0,002
Түйе сүті ҚР СТ 166-2015	Дәмі мен иісі	Таза, жаңа сауылған сүтке тән емес бөгде дәмдер мен иістері жоқ	Сәйкес
	Консиситенциясы	Біртекті, шөгіндісіз және қауысыз	Сәйкес
	Түсі	Ақтан ақшыл сарығы дейін	Сәйкес
	Майдың массалық үлесі, %, кем емес	3,0	4,88±0,001
	Ақуыздың массалық үлесі, %, кем емес	3,8	3,75±0,003
	Құрғақ заттектердің орта мелшері, %	15,0	10,05±0,003
	Лактоза, %*	-	4,45±0,001

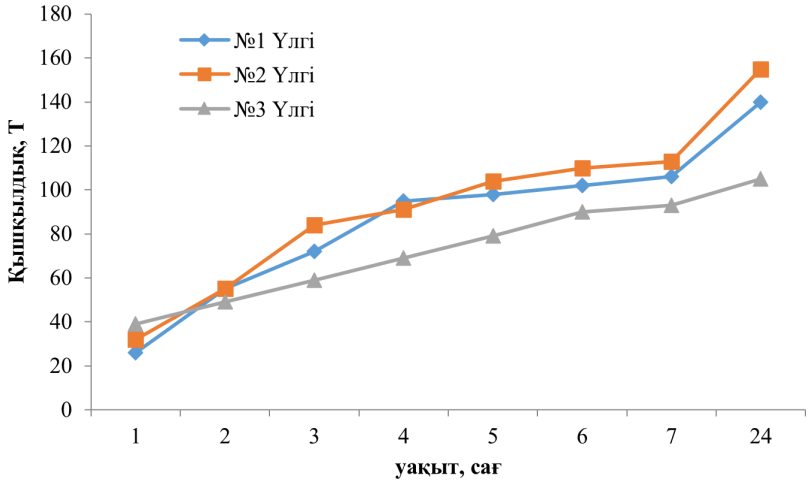
**көрсеткіштерге қатысты ҚР СТ және ГОСТ талаптарыгда белгіленбеген*

2-суретте көрсетілген график бойынша 8 сағат ашыту кезінде титрленетін қышқылдық 90-120 °Т аралығындағы мәндерге жететінін көруге болады. Титрленетін қышқылдықтың ашыту ұзақтығына тәуелділігі бойынша ең белсенді сүттерге №1 және №2 үлгілер, яғни сиыр мен ешкінің сүтін жатқызуға болады. Бұл үлгілерде қышқылдықтың қарқынды артуы KF ұйытқысының құрамындағы термофилді стрептококтардың жоғары ферментативті белсенділігін көрсетеді. Ал № 3 үлгі - түйе сүтінде қышқылдық мәнінің баяу артатыны белгілі болды, бұл оның

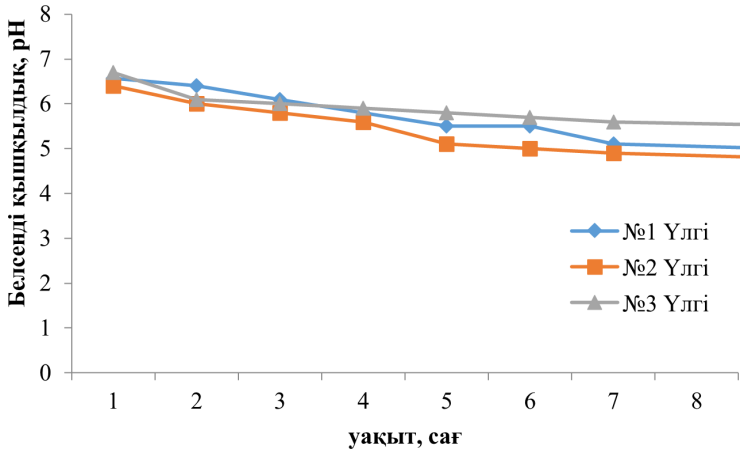
жоғары буферлік сыйымдылығымен және антимикробтық белоктардың әсерімен байланысты.

Сүттің белсенді қышқылдығы (pH) бұл ерітіндідегі сутегі иондарының концентрациясын көрсететін маңызды көрсеткіш. Ол сүттегі қышқылдардың мөлшерін білдіреді және сүттің pH мәнін анықтайды. Белсенді қышқылдық, көбінесе сүттің қышқылдануы немесе ашуы кезінде байқалады. Мұндай өзгерістер көбінесе сүтте сүт қышқылы бактерияларының әрекет етуінен, атап айтқанда лактозаның сүт қышқылына айналуынан пайда болады. Белсенді қышқылдықты өлшеу арқылы сүттің сапасын бағалауға болады, өйткені pH мәнінің күрт төмендеуі микробиологиялық процестердің белсенділігін және өнімнің ұю (коагуляция) нүктесіне жеткенін білдіреді [17].

Зерттеу барысында түйе сүтінің pH көрсеткіші сиыр және ешкі сүтіне қарағанда баяу төмендегені байқалды. Бұл технологиялық тұрғыдан түйе сүтін ашыту кезінде термостаттау уақытын ұзартуды (8 сағатқа дейін) немесе ұйытқы мөлшерін арттыру қажеттілігін негіздейді.



2 - сурет. Ашыту динамикасы



3 - сурет. Белсенді қышқылдық динамикасы (pH)

3-суретте берілген белсенді қышқылдықтың ашыту ұзақтығына тәуелділік графигі бойынша KF ұйытқысының зерттелген сүттің барлық үш түрінде де белсенді жұмыс жасайтыны дәлелденді. Атап айтқанда, № 2 үлгіде (ешкі сүті) белсенді қышқылдықтың (pH) артуы неғұрлым

қарқынды жүрді, бұл ешкі сүтінің микрофлораның дамуы үшін қолайлы биотехнологиялық орта екенін көрсетеді. Ал түйе сүтінде (№ 3 үлгі) белсенді қышқылдық мәнінің өзгеруі баяу жүреді.

Зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып, үш сағаттан астам ұзақ өсіру кезінде титрленетін қышқылдық сүт қышқылды микроорганизмдердің өсуіне қолайлы температуралық жағдай (33±2 °С) жасау арқылы тұрақты артады деген қорытынды жасауға болады. Қышқылдықтың күрт өсуі 4-5 сағат аралығында байқалады, бұл кезең микрофлораның логарифмдік өсу фазасы үшін оңтайлы болып табылады.

Түйе сүтіндегі ашыту процесінің 8 сағатқа дейін созылуы мен қышқылдық деңгейінің баяу көтерілуі оның ерекше биохимиялық құрамымен — құрамындағы антимикробтық белоктардың (лактоферрин, лизоцим) жоғары мөлшерімен және казеин мицеллаларының құрылымымен байланысты. Бұл факторлар тромбтың (ұйытындының) кеш түзілуіне әсер еткенімен, KF ұйытқысы 8 сағат ішінде өнімнің қажетті технологиялық кондицияға жетуін қамтамасыз етті.

Зерттеу барысында сиыр, ешкі және түйе сүтінен дайындалған айранның органолептикалық көрсеткіштері (сыртқы түрі, иісі, дәмі, консистенциясы), сондай-ақ физика-химиялық көрсеткіштері (май, ақуыз, құрғақ заттар және лактоза) анықталып, 2-кестеде жүйеленді (кесте 2).

2 - кесте. Micromilk ұйытқысымен дайындалған айрандардың органолептикалық көрсеткіштері

Көрсеткіштер	ГОСТ 31702-2013. Айран. Техникалық шарттары	Үлгі №1	Үлгі №2	Үлг №3
Дәмі мен иісі	Таза, сүтқышқылды, бөгде дәмдер мен иістерсіз немесе тұз бен су қосылған кезде тұзды	Сәйкес	Сәйкес	Сәйкес
Консистенциясы	Біртекті, Араластырған нан кейін жоғалып кететін сарысудың болуына рұқсат етіледі. Қалыпты микрофлорадан туындаған жеке көздер түріндегі газ	Сәйкес	Сәйкес	Сәйкес
Түсі	Сүтті ақ, бүкіл массасы бойынша біркелкі	Сәйкес	Сәйкес	Сәйкес
Майдың массалық үлесі, %, кем емес	0,5-4,0	3,88±0,002	4,15±0,001	3,93±0,003
Ақуыздың массалық үлесі, %, кем емес	2,8	4,12±0,001	4,31±0,01	3,94±0,001
Құрғақ заттар, %*	-	12,90±0,002	13,15±0,001	12,58±0,003
Лактоза, %*	-	3,35±0,002	3,31±0,003	3,48±0,002

**көрсеткіштерге қатысты ГОСТ талаптарында белгіленбеген*

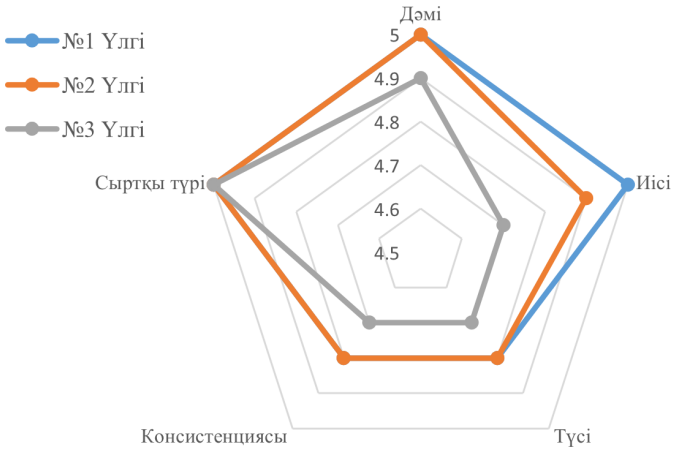
Кесте 2-ге сәйкес, KF ұйытқысымен дайындалған айранның органолептикалық сипаттамалары (дәмі, хош иісі, консистенциясы және түсі) пайдаланылған шикізат түріне тікелей байланысты. Сиыр сүтінен (№ 1 үлгі) алынған айран классикалық, жұмсақ ашытылған сүт дәмімен және біртекті консистенциясымен ерекшеленді. Ешкі сүтінен (№ 2 үлгі) алынған өнімде айқын

әрі ерекше спецификалық дәм байқалды, бұл ешкі сүтінің май қышқылдық құрамымен және KF микрофлорасының метаболизмімен байланысты.

Түйе сүтінен жасалған айран (№ 3 үлгі) сұйық консистенциясымен және жеңіл қышқыл дәмімен ерекшеленеді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, түйе сүтінде ақуыз және құрғақ заттар мөлшерінің төмен болуы ұйытындының тығыздығына тікелей әсер еткен. Дегенмен, KF ұйытқысының құрамындағы ашытқылар түйе сүтіне тән дәмді жұмсартып, өнімге жағымды хош иіс берді.

Өнімдердің сенсорлық сипаттамаларын жүйелі түрде салыстыру мақсатында органолептикалық профилограмма құрастырылды (сурет 4). Профилограмма дәмін, иісін, түсін және консистенциясын сандық (баллдық) әдіспен бағалауға мүмкіндік берді [18].

Профилограмма нәтижесі көрсеткендей, № 2 үлгі (ешкі сүті) дәм мен хош иіс айқындылығы бойынша ең жоғары балл алса, № 1 үлгі (сиыр сүті) консистенцияның тұрақтылығы мен біртектілігі жағынан көш бастады. Түйе сүтінен алынған айран консистенция бойынша төменірек балл алғанымен, өзінің диеталық және емдік қасиеттеріне тән ерекше дәмдік профилімен жоғары бағаланды. Бұл субъективті бағалауларды стандартталған формада ұсыну өнімнің нарықтағы тартымдылығын ғылыми негіздеуге мүмкіндік береді.



4 - сурет. Зерттеу үлгілерінің дегустациялық сараптамасы

4-суретте көрсетілген органолептикалық профилограмма (5 баллдық жүйе бойынша) KF ұйытқысымен ашытылған айран үлгілерінің сенсорлық сипаттамаларын салыстыруға мүмкіндік береді. Сараптама нәтижелері көрсеткендей, сиыр және ешкі сүтінен дайындалған айрандар (№ 1 және № 2 үлгілер) дәмдік қасиеттері мен консистенциясы бойынша ең жоғары балл жинады.

Дәмі мен хош иісі: Ешкі сүтінен алынған айран өзінің айқын әрі жағымды спецификалық дәмімен ерекшеленсе, сиыр сүтінен жасалған үлгі классикалық ашытылған сүт өніміне тән жұмсақ дәм көрсетті. Түйе сүтіндегі (№3 үлгі) түйе сүтіне тән өзіндік иіс пен дәм сақталып қалғаны байқалды, бұл шикізаттың табиғи қасиетінің жоғары болуымен түсіндіріледі.

Консистенция: № 1 және № 2 үлгілер біртекті, тығыз және тұтқыр консистенциясы үшін жоғары бағаланды. Бұл KF ұйытқысының сиыр және ешкі сүтінің ақуыздарымен жақсы әрекеттесіп, тұрақты құрылым түзетінін дәлелдейді. Түйе сүтінен алынған айранның консистенциясы сұйықтау болды, бұл оның құрамындағы құрғақ заттардың төмендігімен және казеин фракцияларының ерекшелігімен байланысты.

Осылайша, KF ұйытқысы сиыр және ешкі сүтінен жоғары органолептикалық сапасы бар өнімдер алуға мүмкіндік береді. Түйе сүтінен

алынған айранның сұйық консистенциясына қарамастан, оның өзіндік дәмі мен иісі функционалдық мақсаттағы өнім ретінде жоғары бағалануына негіз болады.

Қорытынды. Зерттеу нәтижелері айранның органолептикалық және физика-химиялық сипаттамаларына пайдаланылатын сүт түрінің елеулі ықпал ететінін көрсетті.

KF ұйытқысының тиімділігі: Micromilk (KF) ұйытқысының зерттелген сүт түрлерінің (сиыр, ешкі, түйе) барлығында сүт қышқылды бактериялар мен ашытқылардың белсенді дамуын қамтамасыз ететіні расталды. Дайын өнімдердің титрленетін қышқылдығы 90-120 °Т шегінде болып, сапалы ашытылған өнім стандартына сәйкес келді.

Шикізат ерекшеліктері: Сиыр сүтінен дайындалған айран классикалық консистенциясымен ерекшеленсе, ешкі сүтінен алынған үлгі ақуыз (3,50%) бен майдың (5,01%) жоғары құрамымен және ерекше дәмдік профилімен бағаланды.

Түйе сүтінің технологиялық ерекшелігі: Түйе сүтіндегі ашыту процесінің 8 сағатқа дейін созылуы оның биохимиялық құрамымен — құрғақ заттардың төмендігімен (10,05%) және казеин фракцияларының ерекшеліктерімен негізделді. Түйе сүтіндегі табиғи антимикробтық белоктардың (лактоферрин, иммуноглобулин) тежегіш әсері тромбтың (ұйытындының) кешігуіне себеп болады. Осыған байланысты түйе сүті үшін оңтайлы ашыту режимі 33±2 °С температурада 8 сағат деп белгіленді.

Практикалық маңызы: Алынған нәтижелер әртүрлі шикізат түрлерінің ерекшеліктерін ескере отырып, айран өндіру технологиясын оңтайландыруға және жақсартылған функционалдық қасиеттері бар жаңа ашытылған сүт өнімдерін әзірлеуге ғылыми-тәжірибелік негіз болады.

Әдебиеттер

1. Nguyen A., Francis M., Windfeld E., Lhermie G., Kim K. Developing an immersive virtual farm simulation for engaging and effective public education about the dairy industry // Computers & Graphics.-2024. -Vol..118.-P.173-183. .

2. Канарейкина С.Г. Комбинированный продукт с использованием сухого кобыльего молока // Коневодство и конный спорт. -2014. -№.2. - С. 29-31.

3. Асенова Б.К. Показатели качества и идентификации кефира // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - № 6(37). - С. 13-17.

4. Оспанов А.Б. Оценка возможности использования козьего и овечьего молока в производстве йогуртов // Ползуновский вестник. - 2022. -Т.4(1)- С.154-159.

DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.020.

5. Paszczyk B., Czarnowska-Kujawska M. Paszczyk B., Klepacka J., Tońska E. Health-promoting ingredients in goat’s milk and fermented goat’s milk drinks //Animals. - 2023.-Vol.13 (5):907. DOI 10.3390/ani13050907.

6. Садовой В.В., Вобликова Т.В., Пермяков А.В. Жирнокислотный состав козьего и овечьего молока и его трансформация в процессе производства йогурта // Техника и технология пищевых производств.- 2019.-Т.49(4).- С. 555-562. DOI 10.21603/2074-9414-2019-4-555-562.

7. Шувариков А.С. Канина К.А., Красуля О.Н., Пастух О.Н., Робкова Т.О. Физико-химические показатели козьего, овечьего и коровьего молока // Овцы, козы, шерстяное дело.-2017.-№ 1. -С.38-40.

8. Singhal S. Baker R.D., Baker S.S. A comparison of the nutritional value of cow’ s milk and nondairy beverages // Journal of pediatric gastroenterology and nutrition.-2017.-Vol.64 (5). - P. 799-805. DOI 10.1097/MPG.0000000000001380.

9. Суюнчев О.А., Вобликова Т.В. Сыры из козьего молока // Сыроделие и маслоделие. - 2007.-№ 5.-С.10-11.

10. Konuspayeva G., Faye B. Recent advances in camel milk processing //Animals.-2021.-Vol.11 (4):1045. DOI 10.3390/ani11041045.

11. Лысенко К. Пикантный йогурт // Переработка молока. -2017.-№ 5 (212). -С.44-45.

12. Benmeziane–Derradji F. Evaluation of camel milk: gross compositiona scientific overview // Tropical Animal Health and Production.-2021.-Vol.53 (2): 308. DOI 10.1007/s11250-021-02689-0.

13. Getaneh G., Mebrat A., Wubie A., Kendie H. Review on goat milk composition and its nutritive value // Journal of Nutrition and Health Sciences.-2016.-Vol.3 (4).-P.1-10. DOI 10.15744/2393-9060.3.401.

14. Lad S.S., Aparnathi K.D., Mehta B., Velpula S. Goat milk in human nutrition and health–a review // Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.-2017.-Vol.6(5).-P.1781-1792. DOI 10.20546/ijcmas.2017.605.194.

15. Yeleupaeva Sh.K. Zhumagalyeva Zh.Zh., Zhuzbaeva G.O. Bio chemical properties of sour-milk bacteria in preparation of drinks // International Scientific and Practical Conference World Science.-2017.-Vol.5 (4).- P.44-45.

16. Seifu E. Camel milk products: innovations, limitations and opportunities //Food Production, Processing and Nutrition. - 2023. - Vol.5 (1). - P.15. DOI 10.1186/s43014-023-00130-7.

17. Ho T.M., Zou Z., Bansal N. Camel milk: A review of its nutritional value, heat stability, and potential food products//Food Research International.-2022.-Vol.153:110870. DOI 10.1016/j.foodres.2021.110870.

18. Dan T., Hu H., Li T., Dai A., He B., Wang Y. Screening of mixed-species starter cultures for increasing flavour during fermentation of milk//International Dairy Journal.-2022.-Vol.135: 105473. DOI 10.1016/j.idairyj.2022.105473.

References

1. Nguyen A., Francis M., Windfeld E., Lhermie G., Kim K. // Developing an immersive virtual farm simulation for engaging and effective public education about the dairy industry // Computers & Graphics.-2024. -Vol..118.-P.173-183. .

2. Kanarejkina S.G. Kombinirovannyj produkt s ispol’ zovaniem suhogo kobyl’ ego moloka // Konevodstvo i konnyj sport. -2014.-№.2. - S.29-31. [in Russian]

3. Asenova B.K. Pokazateli kachestva i identifikacii kefira // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel’ skij zhurnal.- 2015. - № 6(37). - С.13-17. [in Russian]

4. Ospanov A.B. Ocenka vozmozhnosti ispol’ zovanija koz’ ego i ovech’ ego moloka v proizvodstve jogurtov // Polzunovskij vestnik. - 2022. -T.4(1)- S.154-159.

DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.020. [in Russian]

5. Paszczyk B., Czarnowska-Kujawska M. Paszczyk B., Klepacka J., Tońska E. Health-promoting ingredients in goat’s milk and fermented goat’s milk drinks //Animals. - 2023.-Vol.13 (5):907. DOI 10.3390/ani13050907.

6. Sadovoj V.V., Voblikova T.V., Permjakov A.V. Zhirnokislotnyj sostav koz’ ego i ovech’ ego moloka i ego transformacija v processe proizvodstva jogurta // Tehnika i tehnologija pishhevyh proizvodstv.- 2019.-T.49(4).- S.555-562. DOI 10.21603/2074-9414-2019-4-555-562. [in Russian]

7. Shuvarikov A.S. Kanina K.A., Krasulja O.N., Pastuh O.N., Robkova T.O. Fiziko-himicheskie pokazateli koz’ ego, ovech’ ego i korov’ ego moloka // Ovcy, kozy, sherstjanoe delo.-2017.-№ 1. -S.38-40.

[in Russian]

8. Singhal S. Baker R.D., Baker S.S. A comparison of the nutritional value of cow' s milk and nondairy beverages // Journal of pediatric gastroenterology and nutrition.-2017.-Vol.64 (5). - P. 799-805. DOI 10.1097/MPG.0000000000001380.

9. Sujunchev O.A., Voblikova T.V. Syry iz koz' ego moloka // Syrodelie i maslodelie. - 2007.-№ 5.- S.10-11. [in Russian]

10. Konuspayeva G., Faye B. Recent advances in camel milk processing //Animals.-2021.-Vol.11 (4):1045. DOI 10.3390/ani11041045.

11. Lysenko K. Pikantnyj jogurt // Pererabotka moloka. -2017.-№ 5 (212).-S.44-45. [in Russian]

12. Benmeziane–Derradji F. Evaluation of camel milk: gross composition: a scientific overview // Tropical Animal Health and Production.-2021.-Vol.53 (2): 308. DOI 10.1007/s11250-021-02689-0.

13. Getaneh G., Mebrat A., Wubie A., Kendie H. Review on goat milk composition and its nutritive value//Journal of Nutrition and Health Sciences.-2016.-Vol.3 (4).-P.1-10. DOI 10.15744/2393-9060.3.401.

14. Lad S.S., Aparnathi K.D., Mehta B., Velpula S. Goat milk in human nutrition and health–a review // Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.-2017.-Vol.6(5).-P.1781-1792. DOI 10.20546/ijcmas.2017.605.194.

15. Yeleupaeva Sh.K. Zhumagalyeva Zh.Zh., Zhuzbaeva G.O. Biochemical properties of sour-milk bacteria in preparation of drinks // International Scien tific and Practical Conference World Science.-2017.-Vol.5 (4).- P.44-45.

16. Seifu E. Camel milk products: innovations, limitations and opportunities // Food Production, Processing and Nutrition.- 2023.- Vol.5 (1). - P.15. DOI 10.1186/s43014-023-00130-7.

17. Ho T.M., Zou Z., Bansal N. Camel milk: A review of its nutritional value, heat stability, and potential food products// Food Research International.-2022.-Vol.153:110870. DOI 10.1016/j.foodres.2021.110870.

18. Dan T., Hu H., Li T., Dai A., He B., Wang Y. Screening of mixed-species starter cultures for increasing flavour during fermentation of milk// International Dairy Journal.-2022.-Vol.135: 105473. DOI 10.1016/j.idairyj.2022.105473.

Авторлар туралы мәлімет

Оразов А.Ж. - т.ғ.к., доцент м.а. Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан, e-mail: orazov_ayan@mail.ru;

Рыскалиева Б.Ж..- магистр, аға оқытушы, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан, e-mail: bryskalieva@mail.ru;

Сармалаев А.А.-магистр, оқытушы, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан, e-mail: sarmalayev@gmail.com;

Меркенова А.М. - магистрант, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан, e-mail: merkenova@bk.ru.

Information about the authors

Orazov A. Zh. - candidate of Technical Sciences, acting associate professor Zhangir Khan West Kazakhstan agrarian and technical University, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: orazov_ayan@mail.ru;

Ryskaliyeva B. Zh., - master' s degree, senior lecturer, West Kazakhstan agrarian and technical University named after Zhangir Khan, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: bryskalieva@mail.ru;

Sarmalaev A.A., - master' s degree, Teacher, West Kazakhstan agrarian and technical University named after Zhangir Khan, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: sarmalayev@gmail.com;

Merkenova A.M. - master’ s student, West Kazakhstan agrarian and technical University named after Zhangir Khan, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: merkenova@bk.ru.

IRSTI 65.59.01 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1218**

MICROBIOLOGICAL SAFETY OF HORSEMEAT INTESTINAL BY-PRODUCTS: EFFECT OF ULTRASOUND AND CITRIC ACID TREATMENTS

[1]Sh.B. Baytukenova, [1]A. Kostanova✉, [2]S.B. Baytukenova

[1]NCJSC «S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University», Astana Kazakhstan,
[2]JSC «K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business», Astana, Kazakhstan

✉ *Corresponding author: anel_kostanova@mail.ru*

This study evaluated the microbiological safety of horse intestinal by-products “Qarta” before and after processing, with particular attention to changes during refrigerated storage at 4 °C. Intestinal segments were subjected to different treatments: washing only (control), immersion in citric acid solutions (0.5% and 1.0%), ultrasound treatment (35 kHz, 200 W, 5 min) and a combined treatment (1.0% citric acid followed by ultrasound). Microbiological parameters included total plate count (TPC), pH and the presence of pathogenic microorganisms (Salmonella spp., Listeria monocytogenes, Escherichia coli). The raw intestines exhibited a high initial microbial load (2.6×10^5 CFU/g), confirming the inherent hygienic risks of this by-product. The combined citric acid and ultrasound treatment was the most effective, reducing TPC to 6.0×10^2 CFU/g and maintaining the lowest microbial counts during refrigerated storage for up to 9 days, while no target pathogens were detected in any treated samples. The pH values remained within the acceptable technological range (5.26-6.12), supporting product stability. Additional evaluation of chemical and radiological safety (toxic elements, pesticide residues, Cs-137, Sr-90) confirmed full compliance with TR CU 021/2011 «On Food Safety» and relevant GOST standards. Overall, the results indicate that properly processed horse intestinal by-products can meet microbiological and food safety requirements and can be considered suitable raw materials for the production of delicatessen meat products.

Keywords: microbiological safety, ultrasound treatment, citric acid, horsemeat, intestinal by-products, “Qarta”.

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ КИШЕЧНОГО СЫРЬЯ КОНИНЫ: ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И ЛИМОННОКИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ

[1]Ш.Б. Байтукенова, [1]А.Т. Костанова✉, [2]С.Б. Байтукенова

[1]НАО «Казахский агротехнический, исследовательський университет им.С.Сейфуллина», Астана, Казахстан,
[2]АО «Казахский университет технологий и бизнеса, им. К.Кулажанова», Астана, Казахстан,
e-mail: anel_kostanova@mail.ru

В работе исследована микробиологическая безопасность кишечного сырья лошадей «Қарта» до и после обработки, с особым акцентом на изменения в процессе холодильного хранения (4 °C). Кишечные отрезки подвергали различным видам обработки: только промывке (контроль), выдержке в растворах лимонной кислоты (0,5% и 1,0%), ультразвуковой обработке (35 кГц, 200 Вт, 5 мин) и комбинированной обработке (1,0% лимонной кислоты с последующим воздействием ультразвука). Определяли общую бактериальную обсеменённость (КМАФАнМ), значения pH и наличие патогенных микроорганизмов (Salmonella spp., Listeria monocytogenes, Escherichia coli). В исходном сырье отмечался высокий уровень микробной контаминации ($2,6 \times 10^5$ КОЕ/г), что подтверждает характерные риски для данного побочного продукта. Наиболее эффективной оказалась комбинированная обработка лимонной кислотой и ультразвуком, при которой КМАФАнМ снижалась до $6,0 \times 10^2$ КОЕ/г и сохранялась на минимальном уровне в течение холодильного хранения до 9 суток, при этом целевые патогенные микроорганизмы во всех обработанных образцах не выявлялись. Значения pH находились в технологически допустимых пределах (5,26-6,12), что обеспечивало стабильность продукта. Дополнительная оценка химической и радиационной безопасности (токсичные

элементы, остатки пестицидов, цезий-137, стронций-90) показала полное соответствие требованиям ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» и соответствующих ГОСТ. Полученные результаты подтверждают, что правильно обработанное кишечное сырьё лошадей соответствует требованиям микробиологической и пищевой безопасности и может рассматриваться как перспективное сырьё для производства деликатесных мясных изделий.

Ключевые слова: микробиологическая безопасность, ультразвуковая обработка, лимонная кислота, конина, кишечное сырьё, «Қарта».

ЖЫЛҚЫ ІШЕГІ ШИКІЗАТЫНЫҢ МИКРОБИОЛОГИЯЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІГІ: УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ЖӘНЕ ЛИМОН ҚЫШҚЫЛЫМЕН ӨҢДЕУ ӘСЕРІ

[1]Ш.Б. Байтукенова, [1]А.Т. Костанова✉, [2]С.Б. Байтукенова

[1]«С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық, зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан,
[2]«Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және, бизнес университеті» АҚ, Астана, Қазақстан,
e-mail: anel_kostanova@mail.ru

Бұл жұмыста жылқы ішек шикізатының «қарта» микробиологиялық қауіпсіздігі өңдеуге дейін және өңдеуден кейін зерттелді, әсіресе тоңазытқышта (4 °С) сақтау кезінде болатын өзгерістерге назар аударылды. Ішек сегменттері әртүрлі өңдеу нұсқаларынан өткізілді: тек жуу (бақылау), лимон қышқылының ерітінділерінде (0,5% және 1,0%) өңдеу, ультрадыбыстық өңдеу (35 кГц, 200 Вт, 5 мин) және біріктірілген өңдеу (1,0% лимон қышқылы, содан кейін ультрадыбыс). Зерттеу барысында жалпы микробтық ластану деңгейі (КМАФАнМ), pH мәндері және патогенді микроорганизмдердің (Salmonella spp., Listeria monocytogenes, Escherichia coli) болуы анықталды. Бастапқы шикізатта микробтық контаминация деңгейі жоғары болды (2,6 × 10^5 КОЕ/г), бұл осы қосалқы өнімге тән тәуекелдердің бар екенін растады. Лимон қышқылы мен ультрадыбысты біріктіріп қолдану ең тиімді өңдеу нұсқасы болып анықталды: КМАФАнМ 6,0 × 10^2 КОЕ/г деңгейіне дейін төмендеп, тоңазытқышта 9 тәулікке дейін сақтау барысында ең төмен деңгейде сақталды, ал барлық өңделген үлгілерде мақсатты патогенді микроорганизмдер анықталған жоқ. pH мәндері технологиялық тұрғыдан рұқсат етілген шектерде (5,26–6,12) болды, бұл өнімнің тұрақтылығын қамтамасыз етті. Қосымша түрде химиялық және радиациялық қауіпсіздік көрсеткіштері (токсинді элементтер, пестицид қалдықтары, цезий-137, стронций-90) бағаланып, олардың КО ТС 021/2011 «Тамақ өнімдерінің қауіпсіздігі туралы» талаптарына және тиісті мемлекеттік стандарттарға (МЕМСТ) толық сәйкес келетіні анықталды. Зерттеу нәтижелері дұрыс өңделген жылқы ішек шикізаты микробиологиялық және азық-түлік қауіпсіздігі талаптарына сай келетінін және деликатес ет өнімдерін өндіруге пайдалануға болатынын көрсетті.

Түйін сөздер: микробиологиялық қауіпсіздік, ультрадыбыстық өңдеу, лимон қышқылы, жылқы еті, ішек шикізаты, «Қарта».

Introduction. Horsemeat and its offal play an important role in the traditional diet of Central Asia, where intestinal segments are widely used to produce delicatessen products such as “Qarta”. However, intestinal raw materials are very sensitive to microbial contamination due to their anatomical origin and nutrient-rich composition. The rapid increase in the total amount of food on plates and the potential presence of pathogenic microorganisms such as Salmonella spp., Listeria monocytogenes and Escherichia coli pose serious problems for food safety and limit their shelf life.

Various canning strategies have been studied to improve the microbiological stability of meat and casings. Organic acids, including lactic and citric, are widely known as natural antimicrobial agents capable of reducing surface contamination and lowering pH. Ultrasound (US) has recently attracted the attention of meat scientists as a non-thermal processing method that enhances microbiological inactivation due to cavitation and improves mass

transfer, while preserving the taste and structural properties of products. Studies have shown that combining ultrasound with moderate chemical treatment can lead to synergistic antimicrobial effects and improved product quality [1].

Despite these achievements, there is limited information about the microbiological characteristics of raw materials from horse intestines and the potential for treating organic acids with ultrasound to stabilize them. In particular, little attention is paid to the processing of “Qarta” in the scientific literature, despite its importance in regional cuisine and commercial potential as a delicacy product [2].

Therefore, the purpose of this study was to evaluate the microbiological quality of horse intestines when stored in a refrigerator and evaluate the effectiveness of ultrasound and citric acid treatment, alone or in combination, to improve microbiological safety, pH stability and shelf life [3].

Ultrasound is considered as being one of the few processing technologies with the potential to differentiate into a range of industry segments; as such, it has been widely explored over the last decade. Extensive review articles have shown the multiple applications of ultrasound within the food industry, most being focused on improving product quality and extending the shelf life of fresh and processed products [3].

Well-known applications of ultrasound incorporate the murdering or repressing of bacterial development. It has been detailed that high-intensity ultrasound of recurrence 20–100 kHz and vitality escalated 10–100 W cm^{-1} creates gradients of intense pressure that can modify the structure of microorganisms in food.

Microbial inactivation has been observed using ultrasound [4]. Ultrasound treatment at low energy intensity caused a quick reduction within the number of viable microbes. When used in combination with moderate heat, ultrasound can accelerate the decontamination rate of food and decrease both the duration and intensity of heat treatments and their resulting damage [5].

Ultrasound is an innovative technology and it is based on the application of mechanical waves at a frequency ranging from 20 kHz to 10 MHz which can be classified into two frequency ranges: low-intensity ultrasound (LIUS) which uses high frequencies between 100 kHz and 10 MHz at intensities lower than 1 Wcm^{-2}, whereas high-intensity ultrasound (HIUS), uses intensities higher than 1 Wcm^{-2} at low frequencies between 20 kHz and 100 kHz [6].

HIUS has the ability to change the chemical and physical properties of food in filtration, drying, sterilization, extraction, food preservation, emulsification, treating, bleaching, etc. The benefits of HIUS applications in the food industry are increased efficiency, made strides mass and heat transfer, reduced processing time, expanded physical blending, lower processing temperature, selective extraction, expanded surrender, etc. [7].

Due to the non-invasive and non-destructive nature of LIUS, this innovation is suitable for following the food processes, giving an evaluation of physicochemical changes of food during processing, as well as for food analysis and detection. Different from LIUS, HIUS has a strong physicochemical effect on foods.

Many studies have shown that HIUS has a positive impact on the quality of meat [8]. Be that as it may, there are reports of antagonistic impacts of this innovation on the organoleptic and physicochemical properties of meat. As a case, lipid oxidation in meat preparing for the most part comes about within the generation of off-flavors and off-odors, driving to adverse sensory properties. It has been demonstrated that HIUS energizes oxidation of both, lipid and protein [9,10]. An issue that must be tended to is that the retained vitality of HIUS may lead to warm era rising to hoisted temperatures and hence coming about in warm harm to meat [11,12].

The impacts of HIUS on water holding capacity and trickle misfortune of meat can be assessed emphatically or contrarily, the changes depend on fiber sort and orientation, biochemical properties as well as control and time of ultrasonication.

It has also been reported that Gram-positive

microorganisms are more resistant to ultrasound treatments than Gram-negative microorganisms. Research studies have primarily focused on the deactivation of Listeria monocytogenes, Escherichia coli, a series of Salmonella spp., Staphylococcus aureus and some other microorganisms [13].

In recent times, food industries of developing countries within the wake of successfully preserving food are implementing hurdle innovation. To increase food, save it from microorganisms and prolong shelf-life of energy-sensitive, nutritional, and organoleptic characteristics, the use of ultrasound is of extraordinary significance.

In this study, characteristics of the physicochemical and microbiological quality of meat treated with high-intensity ultrasound were evaluated in order to decide the impact of different sonication treatment times on the meat during storage.

This paper discusses the application of ultrasound to the processing of Qarta horsemeat secondary intestinal raw materials in the meat industry. It will consider the issues of de-oiling and processing of intestinal raw materials, physicochemical, organoleptic and microbiological parameters, as well as evaluating their influence on product quality and justifying the choice of one of the types of intestinal raw materials.

In the present study, particular attention was given to evaluating how ultrasound treatment (35 kHz, 200 W, 5 min) and mild citric acid immersion (0.5-1.0%) influence the microbiological safety, pH stability, and structural characteristics of horse intestinal by-products («Qarta»). These processing techniques were selected due to their potetntial to enhance product quality and reduce microbial contamination while maintaining the natural properties of the raw material.

Materials and methods. Sample preparation. According to information of Stanisławczyk et al. horse age divided to group I-foals and young horses up to 2 years of age, group II-adult horses from 2 to 10 years of age, and group III-older horses from 10 to 20 years of age.

Since the Kazakhs were good cattle breeders, they had a classification of horses - by suit, by purpose, by age for slaughtering Table 1.

Table 1 - Classification of horses by age and the corresponding Kazakh terminology

Age of horses	Description	The name in the Kazakh language for each type
Up to 6 months old	Foal	Qulyn
6-7 months	Plump foal	Jabagy
Over a 1 year old	Foal	Tay
2-2,5 years old	Young male, accustomed to the saddle	Qunan
2-2,5 years old	Young mare	Qunazhun
3-4 years old	Young virgin male horse	Donen
3-4 years old	Young virgin female mare	Baytal
5 years old	Adult horse	Aygyr
5 years old	Adult mare	Bie

A total of 3 different age categories of the Kazakh horse meat breed took part in the study. In this study, the secondary intestinal raw materials of horse meat of the Kazakh breed «Qarta» of 3 age categories of slaughtering (over a 1-year-old – Tay; 2-2,5 years old – Qunan, 3-4 years old - Baytal)

were considered, as this is the best suitable intestinal raw material for further processing and use in the production of a new food product.

The intestine of a slaughter animal is a part of the digestive tube of an animal, following the stomach and ending in the anus. Fig.1 «Qarta» is intestinal secondary raw material of horse meat with the presence of cream or yellow colored fatty tissue. The Qarta is the raw rectum consisting of an intestine diameter of 80 to 200 mm and a length of 0.3 to 1.0 m. Characteristic features of this type of colon clean and dry surface, without lesions or stains. Since the beginning of the development of industrial sausage production both in the Republic of Kazakhstan and worldwide, intestinal casings have been used in the production of cooked, smoked sausages, sausages, wieners and other products. They meet most of the requirements for sausage casings: they have sufficient strength, elasticity, smoke and moisture permeability, as well as resistance to high temperatures; give products the necessary commodity properties that allow to determine the type of finished product; protect the product from external factors that can lead to its spoilage. To preserve the quality of intestinal raw materials under production and storage conditions, they are preserved, mainly by salting or drying.



Tay **Qunan** **Baytal**

Fig.1 - The secondary intestinal raw materials of horse meat of the Kazakh breed «Qarta» of 3 age categories of slaughtering (over a 1 year old - Tay; 2-2,5 years old - Qunan, 3-4 years old - Baytal)

Taking into account the identified progressive technical solutions in improving the technology of natural casing processing, as which is used intestinal raw material of horsemeat «Qarta» for the development of a complex meat product, as well as modern scientific trends concerning the preservation of quality during processing and ensuring the microbiological safety of products, studies have been conducted to create a new technological method of processing, which has a significant antimicrobial effect.

Microbiological safety indicators, including total plate count and the presence of Salmonella, Listeria monocytogenes and Escherichia coli, were evaluated using standard culture-based methods. Microbiological evaluation was performed in accordance with TR CU 021/2011 «On Food Safety» and the requirements of GOST 10444.15-94 and GOST 10444.2-94 [14,15,16].

Bacterial cultures and microbiological analysis of raw materials before treatment (or samples not treated with ultrasound). Samples of intestinal raw materials were prepared according to the following protocol of Serial Dilution technique [17]. Fig.2. As stock solution was used NaCl salt solution 0.85 %.3 samples of intestine raw materials collected from Kazakh breed horse.

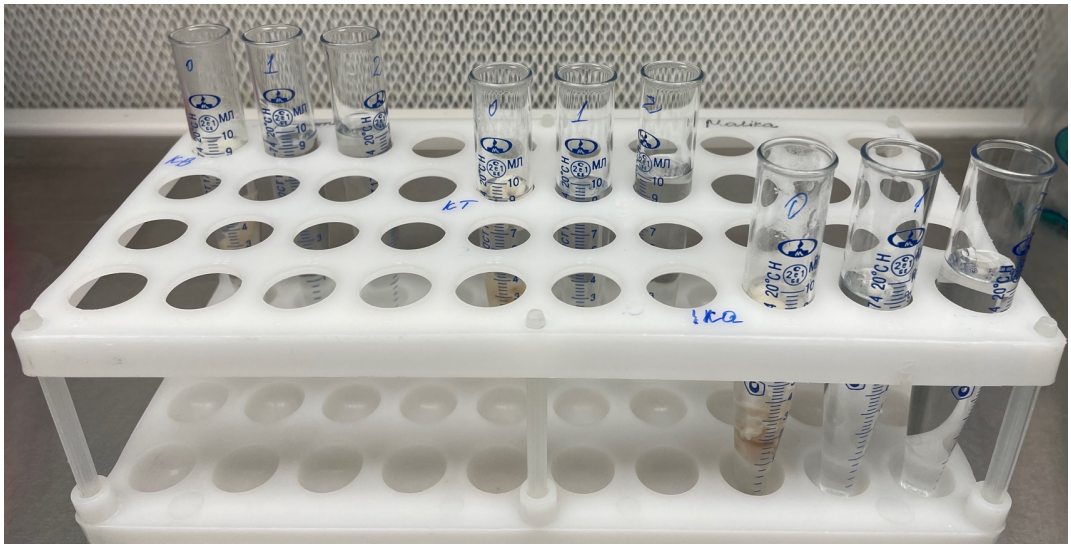
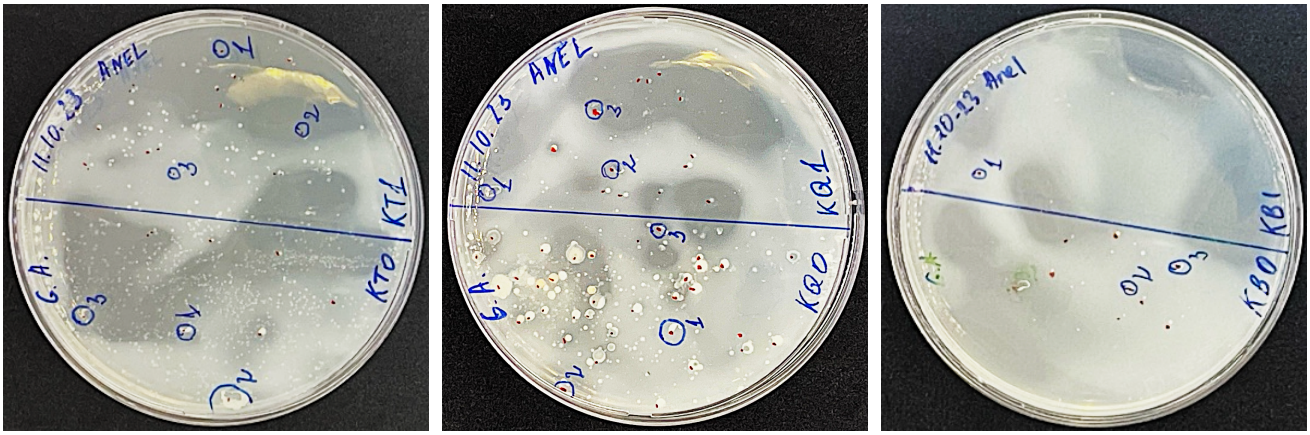


Fig.2 - Serial Dilution Method of Estimating Viable Count of Bacteria

The basic medium that was utilized for the cultivation of intestine of a slaughter horse microorganisms was composed of the following constituents (g/L): peptone (4); yeast extract (1); gelatin (15); agar powder (15), pH 7.0. A gelatin agar medium was used for screening the microorganisms on plates.

Fig.3 series of dilutions from 1:10 to 1:100 were prepared and seeding on the plate with gelatin agar and were incubated overnight at 37 ◦C to obtain single colonies.



Tay **Qunan** **Baytal**

Fig.3 - Serial Dilution Method of Estimating Viable Count of Bacteria

The plates were flooded with Trcichloracetic Acid (TCA), and clear zones around the bacterial growth were recorded as positive for collagenolytic activity. The new medium was tested with a variety of anaerobic bacteria, and the results were compared with data obtained with the conventional technique for detecting collagenolytic activity. Overall, there was satisfactory agreement in the detection of collagenolytic activity. The following equation was used to calculate the number of colony-forming units (CFU) mL^{-1} in the exudate of each samples:

$$CFUmL^{-1} = \text{number of bacteria/mL} \quad (1)$$

$$CFUmL^{-1} = A * DF * 10 \quad (2)$$

where A is the average number of colonies in a dilution and DF is dilution factor, which depends in the dilution used, as follows: 1 for 1:0, 10 for 1:10, 100 for 1:100, etc.

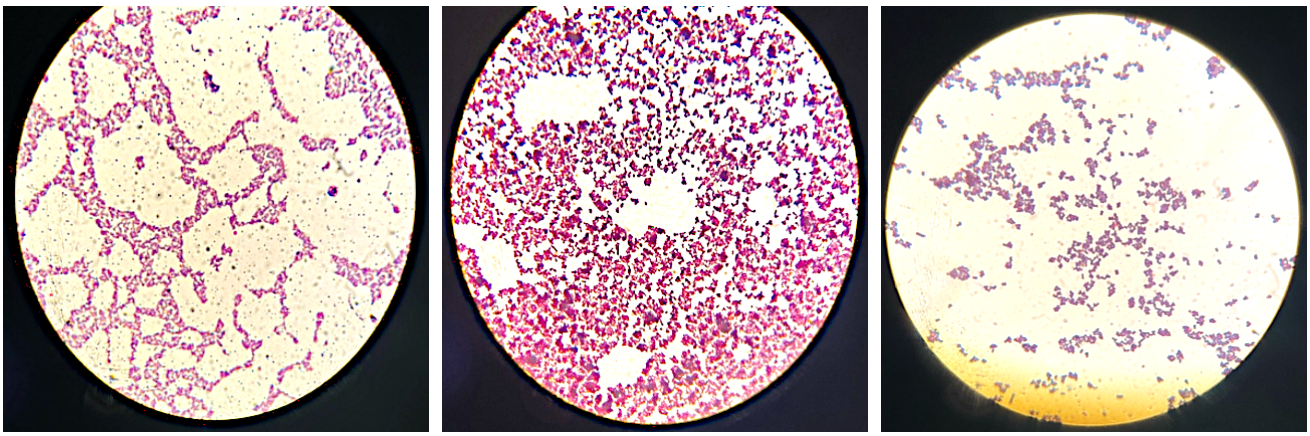
$$\text{Plate with Tay 1:100 (KT1)} = 50 \cdot 1 \cdot 10 = 5 \cdot 10^2 \text{ CFU mL}^{-1}$$

$$\text{Plate with Qunan 1:100 (KQ1)} = 20 \cdot 1 \cdot 10 = 2 \cdot 10^2 \text{ mL}^{-1}$$

$$\text{Plate with Baytal 1:100 (KB1)} = 1 \cdot 1 \cdot 10 = 10^1 \text{ mL}^{-1}$$

Due to the fact that the age category of 3-4 years old grew few colonies is explained by the fact that in developed and older species of slaughter animals gastrointestinal tract is better developed, as well as in this species of horse meat intestinal raw material is wider in diameter, which facilitates further use as a natural casing for the development of delicacy meat product, unlike young animals, so it was decided to continue work with the species Baytal.

Light Microscopy. The microstructure of the intestine samples before and after ultrasound-assisted brining was observed with an optical microscope. The meat samples were searched by Gram Staining [18]. Gram staining is a differential staining method since more than one dye is used as primary and secondary dyes. In gram staining, gram-negative bacteria lose their crystal violet iodine (CV-I) complex and become colorless after washing, but gram-positive bacteria retain the CV-I complex and remain purple. The color of the purple gram-positive bacteria isn't affected from safranin, the discolored gram-negative bacteria are dyed pink with safranin. This test differentiates the bacteria into gram-positive and gram-negative bacteria, which helps in the classification and differentiation of microorganisms. In this practice, gram staining procedure are applied on the bacteria after preparation of smear of seeding plates with intestinal raw materials of horsemeat "Qarta". Samples were observed using a Zeiss Primo Star light microscope (Carl Zeiss Ltd., Jena, Germany) after Gram staining (Fig.4).



Tay **Qunan** **Baytal**

Fig.4 - Microstructural characteristics of the «Qarta» samples before treatmnets. Images were obtained using a Zeiss Primo Star (Carl Zeiss Ltd., Jena, Germany) light microscope after Gram staining

Ultrasound treatment was carried out in a 10-L ultrasonic bath (Sapphire UZV-28 TTC, Moscow, Russia) at a frequency of 35 kHz an power of 200 W. Samples were placed at a distance of 3-5 cm from the emitter and fully submerged in distilled water. The temperature of the medium did not exceed 25°C, which was controlled by periodic mixing of the bath. Total sonication time was 5 minutes.

Citric acid solutions (0.5% and 1.0%) were prepared in distilled water at 20-22°C. Samples were immersed in the solution for 5 minutes at a raw-material-to-solution ratio of 1:5 to ensure uniform diffusion. After treatment, samples were rinsed under running water for 1 minute.

Results and Discussions. Horse intestines were prepared by washing, segmenting, and packaging according to standard microbiological protocols. During the main experiment, the samples were analyzed for the total number of plates (TPC), pH and the presence of pathogenic microorganisms (Salmonella spp., Listeria monocytogenes and Escherichia coli) when stored in the refrigerator (4 °C) for 13 days.

In addition to the control group, additional procedures were performed to evaluate modern processing methods. The intestines were immersed in citric acid solutions (0.5% and 1.0%, IV) for 5 minutes, and treated with ultrasound (35 kHz, 200 W, 5 min) or subjected to a combined treatment consisting of citric acid (1.0%, 5 min) followed by ultrasound (5 min). After processing, all samples were washed in running water, drained, and stored under identical conditions.

Ultrasound treatment was carried out in a Sapphire UZV-28TTC bath (Moscow, Russia) at a frequency of 35 kHz and power of 200 W, which corresponds to the standard high-intensity sonication mode used for protein-containing raw materials. These parameters were selected because they ensure effective cavitation without excessive heating of the tissue; the temperature of the medium did not exceed 25–28 °C during treatment. The samples were placed at a fixed distance of 3–4 cm from the ultrasonic emitter to guarantee uniform energy distribution. The temperature of the ultrasonic bath was monitored throughout processing to avoid thermal denaturation of the sample.

Microbiological analyses included determination of the total number of bacteria on the tablet (TPC), pH measurement and detection of pathogenic microorganisms (Salmonella spp., Listeria monocytogenes, Escherichia coli). The studies were conducted on the 1^{st}, 5^{th}, 9^{th} and 13^{th} days of storage in the refrigerator.

To provide a clear comparison of the microbiological safety of the samples after various treatments, the key parameters were summarized in Table 2. Since the main objective of the study was to evaluate the effectiveness of citric acid and ultrasound in reducing contamination, the table highlights the presence or absence of target pathogens and the corresponding pH values. Quantitative TPC enumeration was available only for the untreated control and the combined treatment, which demonstrated the most significant reduction in microbial load. For other treatments, qualitative microbiological assessment confirmed the absence of pathogens and a decrease in contamination levels.

As shown in Table, the greatest reduction of microbial load and lipid oxidation was observed in the combined treatment group. This treatment also omproved texture parameters and extended the shelf life to ≥9 days. Citric acid alone and ultrasound alone provided moderate improvements, while potassium sorbate and other acids showed limited effectiveness.

The observed reduction in microbial load after ultrasound treatment is associated with acoustic cavitation, which generates localized pressure changes capable of damaging bacterial cell membranes. Citric acid, in turn, decreases pH and disrupts bacterial membrane permeability. When combined (citric acid and ultrasound), a synergetic antimicrobial effect was observed, resulting in the lowest TPC values throughout refrigerated storage.

In addition to the control group (washed intestines without treatment), additional studies were conducted to evaluate modern processing technologies:

Citric acid (CA): soaking in 0.5% or 1.0% solution (IV) for 5 minutes.

Ultrasound: immersion in distilled water and exposure to ultrasound with a frequency of 35 kHz and a power of 200 Watts for 5 minutes using a 10-liter ultrasonic bath (Sapphire UZV-28 TTC, Moscow, Russia).

Combined treatment (citric acid and ultrasound): soaking in 1.0% citric acid solution for 5 min, followed by ultrasound treatment at the same parameters (35 kHz, 200 W, 5 min).

Table 2 - Microbiological safety and pH of horse intestinal raw materials («Qarta») after different processing treatments

Treatment	Pathogens (Salmonella, L.monocytogenes, E.coli)	pH	Comment
Control (untreated)	Present in raw material	6.12	High initial contamination
Citric acid 0.5%	Not detected	5.83	Reduced microbial risk
Citric acid 1.0%	Not detected	5.76	Stronger acid effect
Ultrasound	Not detected	5.61	Non-thermal treatment
Citric acid+Ultrasound	Not detected	5.32	Most effective combined approach

Note: Quantitative TPC enumeration was performed only for the control and combined treatment groups. All other treatments were assessed qualitatively based on the absence of pathogenic microorganisms and pH changes.

After processing, the samples were washed in running water for 1 min, transferred to sterile absorbent paper, packaged and stored at a temperature of 4°C [19].

The aim of this work was to apply ultrasound on samples in order to see the changes in raw materials properties at experimental level in an attempt to view the effect of sonication over the whole of the intestinal secondary raw material of horsemeat “Qarta”. It is well known that pH is one of the parameters with great influence on meat quality and is directly related to characteristics such as WHC, color and texture of meat.

It is known that WHC in any muscle is minimal at low hH, but it tends to increase with maturation owng to protein degradation and changes in electric charges by intramolecular rearrangement. In the present study the performance of WHC can be explained by the pH decrease observed throughout the storage period. WHC is related to many physicochemical characteristics of myofibrillar and protein components. The results of the present study agree partially with the results of others, who also found an increase in WHC of sonicated meat [20].

One of the most important ”barriers” in the production of meat products is a low pH value. It is difficult to overestimate the value of pH in the technology of meat products, largely due to the fact that it is fast and informative. The high informativeness of this indicator is explained by the fact that the change in its values significantly affects the properties of meat raw materials, in particular: moisture-binding capacity, colour, consistency (friability, rigidity, etc.) odour, taste, the rate of penetration of salting substances and stability during storage. Considering that the pH value for cooked meat products should not be lower than 5,8 and not higher than 6,4 (Table 3).

Hygienic standards for microbiological indicators include control of four groups of microorganisms: sanitary indicator microorganisms, which include the number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms (NMAFAnM) and E. coli bacteria; opportunistic

microorganisms (E. coli, S. Aureus, Proteus, B. Cereus and sulfuric acid bacteria). E.coli, S. Aureus, Proteus, B. Cereus and sulphite-reducing clostridia) pathogenic microorganisms, including Salmonella, Listeria monocytogenes; spoilage microorganisms.

Microbiological examination of the meat product allows us to assess its condition and suitability for use in the production of meat products.

As a result of microbiological analysis the compliance of microbiological indicators with the established indicators according to the normative documentation was established. Coliforms, L.monocytogenes, pathogenic microorganisms including salmonella were not detected. Microbiological parameters of intestinal raw horse meat after ultrasonic treatment are shown in Table 4. It can be seen that at 30 degrees all microorganisms cease their activity.

Table 3 - Organoleptic and physicochemical characteristics of horse intestinal raw materials

Name of indicators	Characteristics and standards	Results
1	2	3
Appearance	Moderately moist, not contaminated with foreign matter	Moderately moist, not contaminated with foreign matter
Colour	Ccream, light beige, beige	Beige
Odour	Characteristic of good quality products, with no offensive odour	Characteristic of good quality products, with no offensive odour
pH meat extract, not less	No more than 6,2	6,12
Mass fraction of fat	-	9,86
Ammonia nitrogen determination	negative reaction	negative reaction
Protein determination	-	9,035

Microbiological analysis after ultrasound treatment. In order to ensure product safety, a system of hazard analysis and critical control points (HACCP) is in place at the enterprises.

Table 4 - Microbiological parameters of intestinal raw horse meat after ultrasonic treatment

Name of indicators	Characteristics and standards	Results
1	2	3
NMAFAnM, CFU/mL, not more	$5x10^6$	$3,2x10^4$
Presence of coliforms	not allowed	absent
Presence of sulphite-reducing clostridia in 0.1 g of product	not allowed	absent
Pathogenic, including salmonellae in 25g	not allowed	absent

As a result of microbiological analysis, compliance of microbiological indicators with the established indicators according to the regulatory documentation was established.

Microbiological analysis of intestinal raw

materials showed that in the process of heat treatment contamination of raw materials is significantly reduced (from 260 000 to 600 microbes in 1 g of the product), such microorganisms as salmonellae, proteins, sulfite reducing, clostridia, coaguladepositive staphylococci and other pathogenic microflora after heat treatment are not detected.

The table 5 presents the results of the safety assessment of horsemeat intestinal by-products, including the levels of toxic elements (Pb, Cd, Hg, As), organochlorine pesticides (HCH isomers, DDT and its metabolites) and radionuclides (Cs-137, Sr-90). All indicators were evaluated in accordance with the requirements of TR CU 021/2011 «On Food Safety». Analytical measurements were carried out using standardized methods: atomic absorption spectrometry for toxic elements (GOST 30178-96), gas-liquid chromatography for pesticide residues (GOST 23452-2015), and gamma-spectrometric analysis for radionuclides (GOST 32161-2013). The obtained results demonstrate that all contaminants were absent or significantly below the permissible limits, confirming full compliance of the products with food safety standards.

Table 5 - Chemical, toxicological and radiological safety indicators of horsemeat intestinal by-products in accordance with TR CU 021/2011 and relevant GOST standards

Indicator	Regulatory limit (TR CU 021/2011 / GOST)	Result	Compliance
Pesticides, mg/kg, not more:			
HCH (α, β, γ isomers)	≤ 0.1 (GOST 23452-2015)	absent	Meets requirements
DDT and metabolites	≤ 0.1 (GOST 23452-2015)	absent	Meets requirements
Toxic elements, mg/kg, not more:			
Lead (Pb)	≤ 0.5 (GOST 30178-96)	absent	Meets requirements
Arsenic (As)	≤ 0.1 (GOST 30178-96)	absent	Meets requirements
Cadmium (Cd)	≤ 0.03 (GOST 30178-96)	0.03	Meets requirements
Mercury (Hg)	≤ 0.1 (GOST 30178-96)	absent	Meets requirements
Radionuclides, Bq/kg, not more:			
Cesium-137	≤ 200 (GOST 32161-2013)	0.0 ± 12.2	Below limit
Strontium-90	no limit in TR CU	0.0 ± 1.0	Safe

According to the results of the analysis of food safety indicators the meat product complies with the food safety norms, the content of radionuclides - caesium-137 and strontium – 90 does not exceed the maximum permissible norm (200 bq/kg) and corresponds to 0,0±12,2; 0,0±1,0 bq/kg. All the results of the food safety analysis indicate that the intestinal raw material after ultrasonic bath treatment has no effect on the food safety indicators and is ready for further sale.

Thus, the optimum ratio of processing of intestinal raw materials, which have a positive effect on microbiological, physico-chemical and food safety parameters, was identified. The research methods were carried out according to the normative documents in the RSE ”Centre of Sanitary-Epidemiological Expertise” of the Medical Centre of the Medical Centre of the Presidential Administration Medical Centre of the Presidential Administration of the Republic of Kazakhstan” on the right of economic management, Astana, Kazakhstan.

Comparative analysis of the treatment groups revealed distinct differences in microbial dynamics and physicochemical stability. The control samples demonstrated the fastest increase in TPC values, exceeding 6.0 log CFU/g by day 9. Samples treated with citric acid (0.5-1.0%) showed a slower growth rate and maintained TPC below 5.0 log CFU/g at the same storage point. Ultrasound treatment alone resulted in an additional reduction of 0.3-0.5 log CFU/log compared with citric acid treatment. The combined citric acid and ultrasound treatment demonstrated the strongest effect, maintaining the lowest TPC values (below 4.0 log CFU/log on day 9) and ensuring the most stable pH profile throughout storage. These results confirm a synergistic antimicrobial interaction between ultrasound and citric acid. The synergistic reduction in microbial load is attributed to cavitation-induced structural damage of bacterial cells and the acidification effect of organic acids, which together enhance membrane permeability and accelerate bacterial inactivation.

Conclusion. The study showed that intestinal offal from horse meat (“Qarta”) is very sensitive to microbiological contamination, which limits their safe use as raw materials for the production of delicatessen products. Microbiological assessment confirmed that untreated intestines carry a high microbial load, while treatment with ultrasound and citric acid significantly increases safety. Combined treatment with 1.0% citric acid (5 min) followed by ultrasound (35 kHz, 200 W, 5 min) was recognized as the most effective method to reduce the total number of viable microorganisms from 2.6×10^5 to 6.0 × 102 CFU/g and maintain a low level of microbial growth during 13 days of storage. in the fridge. After treatment, pathogenic microorganisms such as Salmonella spp., Listeria monocytogenes and Escherichia coli were not detected. In addition, the pH values remained stable within the acceptable technological range (5.26–5.52), which confirms the stability of the product. These results indicate that treatment with citric acid using ultrasound can serve as a promising approach to ensure microbiological safety and prolong the shelf life of horse intestines, which will allow them to be used in the production of high-quality delicatessen meat products. The combined use of ultrasound and mild organic acid treatment can therefore be considered a promising and technologically feasible approach for improving the microbiological safety «Qarta» and similar intestinal by-products.

Литература

1. Rathnayake P.Y., Yu R., Yeo S.E., Choi Y.-S., Hwangbo S., Yong H.I. Application of ultrasound to animal-based food to improve microbial safety and processing efficiency//Food Science of Animal Resources. -2025. -Vol.45(1). -P.199-222. DOI 10.5851/kosfa.2024.e128.

2. Bariya A.R., Rathod N.B., Patel A.S., Nayak J.K.B., Ranveer R.C., Hashem A., Abd_Allah E.F., Ozogul F., Jambrak A.R., Rocha J.M. Recent developments in ultrasound approach for preservation of animal origin foods//Ultrasonics Sonochemistry. -2023. -Vol.101:106676. DOI 10.1016/j.ultsonch.2023.106676.

3. Chandrapala J., Oliver C., Kentish S., Ashokkumar M. Ultrasonics in food processing //Ultrasonics Sonochemistry. -2012. -Vol.19(5). -P. 975–983. DOI 10.1016/j.ultsonch.2012.01.010.

4. Sagong H.-G., Lee S.-Y., Chang P.-S., Heu S., Ryu S., Choi Y.-J., Kang D.-H. Combined effect of ultrasound and organic acids to reduce Escherichia coli O157:H7, Salmonella Typhimurium, and Listeria

monocytogenes on organic fresh lettuce //International Journal of Food Microbiology. -2011. -Vol.145(1). -P.287-292. DOI 10.1016/j.ijfoodmicro.2011.01.010.

5. Char C.D., Mitilinaki E., Guerrero S.N., Alzamora S.M. Use of high-intensity ultrasound and UV-C light to inactivate some microorganisms in fruit juices //Food and Bioprocess Technology. -2010. -Vol.3(6). -P.797-803. DOI 10.1007/s11947-009-0307-7.

6. Gallo M., Ferrara L., Naviglio D. Application of ultrasound in food science and technology: a perspective //Foods. -2018. -Vol.7 (10):164. DOI 10.3390/foods7100164.

7. Sorathiya K.B., Melo A., Hogg M.C., Pintado M. Organic acids in food preservation: exploring synergies, molecular insights, and sustainable applications //Sustainability. -2025. -Vol.17(8): 3434. DOI 10.3390/su17083434.

8. Zhang M., Haili N., Chen Q., Xia X., Kong B. Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles// Meat Science. -2018. -Vol. 136. -P.1-8. DOI 10.1016/j.meatsci.2017.10.005.

9. Alarcon-Rojo A.D., Carrillo-Lopez L.M., Reyes-Villagrana R., Huerta-Jiménez M., Garcia-Galicia I.A. Ultrasound and meat quality: a review //Ultrasonics Sonochemistry. -2019. -Vol.55. -P.369–382. DOI 10.1016/j.ultsonch.2018.09.016.

10. Faustman C., Sun Q., Mancini R., Suman S.P. Myoglobin and lipid oxidation interactions: mechanistic bases and control //Meat Science. -2010. -Vol.86(1). -P.86-94. DOI 10.1016/j.meatsci.2010.04.025.

11. Alarcon-Rojo A.D., Janacua H., Rodriguez J.C., Paniwnyk L., Mason T.J. Power ultrasound in meat processing//Meat Science. -2015. -Vol.107. -P.86-93. DOI 10.1016/j.meatsci.2015.04.015.

12. Kasaai M.R. Input power-mechanism relationship for ultrasonic irradiation: food and polymer applications //Natural Science. -2013. -Vol.5(8). -P.14-22. DOI 10.4236/ns.2013.58a2003.

13. Stanisławczyk R., Żurek J., Rudy M., Gil M. Influence of horse age on carcass tissue composition and horsemeat quality: exploring nutritional and health benefits for gourmets // Applied Sciences. -2023. -Vol.13(20):11293. DOI 10.3390/app132011293.

14. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011. О безопасности пищевой продукции. -Москва: Евразийская экономическая комиссия. -2011. -46 с.

15. Продукты пищевые. Метод выявления бактерий рода Salmonella: ГОСТ 31659-2012 (ISO 6579:2002). -Москва: Госстандартинформ. - 2014. -25 с.

16. Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий): ГОСТ 31747-2012. - Москва: Госстандартинформ. - 2013. -16 с.

17. Ben-David A., Davidson C.E. Estimation method for serial dilution experiments// Journal of Microbiological Methods. -2014. -Vol.107. -P.214–221. DOI 10.1016/j.mimet.2014.08.023.

18. Erkmen O. Gram staining technique // Laboratory Practices in Microbiology. -2021. -P.99–105. DOI 10.1016/b978-0-323-91017-0.00028-7.

19. Kostanova A., Baytukenova S., Baytukenova S., Ryspaeva U., Yussupova G., Shadyarova Z., Bekakhmetov A. Impact of combined ultrasound and citric acid treatments on the quality and safety of natural horse casings over storage durations // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. -2025. -Vol 75(1). -P.37- 48. DOI 10.31883/pjfns/200346.

20. Siró I., Vén Cs., Balla Cs., Jónás G., Zeke I., Friedrich L. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat //Journal of Food Engineering. -2009. -Vol.91(2). -P.35- 362. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2008.09.015.

References

1. Rathnayake P.Y., Yu R., Yeo S.E., Choi Y.-S., Hwangbo S., Yong H.I. Application of ultrasound to animal-based food to improve microbial safety and processing efficiency//Food Science of Animal Resources. -2025. -Vol.45(1). -P.199-222. DOI 10.5851/kosfa.2024.e128.

2. Bariya A.R., Rathod N.B., Patel A.S., Nayak J.K.B., Ranveer R.C., Hashem A., Abd_Allah E.F., Ozogul F., Jambrak A.R., Rocha J.M. Recent developments in ultrasound approach for preservation of animal origin foods//Ultrasonics Sonochemistry. -2023. -Vol.101:106676. DOI 10.1016/j.ultsonch.2023.106676.

3. Chandrapala J., Oliver C., Kentish S., Ashokkumar M. Ultrasonics in food processing //Ultrasonics Sonochemistry. -2012. -Vol.19(5). -P. 975–983. DOI 10.1016/j.ultsonch.2012.01.010.

4. Sagong H.-G., Lee S.-Y., Chang P.-S., Heu S., Ryu S., Choi Y.-J., Kang D.-H. Combined effect of ultrasound and organic acids to reduce Escherichia coli O157:H7, Salmonella Typhimurium, and Listeria monocytogenes on organic fresh lettuce //International Journal of Food Microbiology. -2011. -Vol.145(1). -P.287-292. DOI 10.1016/j.ijfoodmicro.2011.01.010.

5. Char C.D., Mitilinaki E., Guerrero S.N., Alzamora S.M. Use of high-intensity ultrasound and UV-C light to inactivate some microorganisms in fruit juices //Food and Bioprocess Technology. -2010. -Vol.3(6). -P.797-803. DOI 10.1007/s11947-009-0307-7.

6. Gallo M., Ferrara L., Naviglio D. Application of ultrasound in food science and technology: a perspective //Foods. -2018. -Vol.7 (10):164. DOI 10.3390/foods7100164.

7. Sorathiya K.B., Melo A., Hogg M.C., Pintado M. Organic acids in food preservation: exploring synergies, molecular insights, and sustainable applications //Sustainability. -2025. -Vol.17(8): 3434. DOI 10.3390/su17083434.

8. Zhang M., Haili N., Chen Q., Xia X., Kong B. Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles// Meat Science. -2018. -Vol.136. -P. 1-8. DOI 10.1016/j.meatsci.2017.10.005.

9. Alarcon-Rojo A.D., Carrillo-Lopez L.M., Reyes-Villagrana R., Huerta-Jiménez M., Garcia-Galicia I.A. Ultrasound and meat quality: a review //Ultrasonics Sonochemistry. -2019. -Vol.55. -P.369–382. DOI 10.1016/j.ultsonch.2018.09.016.

10. Faustman C., Sun Q., Mancini R., Suman S.P. Myoglobin and lipid oxidation interactions: mechanistic bases and control //Meat Science. -2010. -Vol.86(1). -P.86-94. DOI 10.1016/j.meatsci.2010.04.025.

11. Alarcon-Rojo A.D., Janacua H., Rodriguez J.C., Paniwnyk L., Mason T.J. Power ultrasound in meat processing//Meat Science. -2015. -Vol. 107. -P.86-93. DOI 10.1016/j.meatsci.2015.04.015.

12. Kasaai M.R. Input power-mechanism relationship for ultrasonic irradiation: food and polymer applications //Natural Science. -2013. -Vol.5(8). -P.14-22. DOI 10.4236/ns.2013.58a2003.

13. Stanisławczyk R., Żurek J., Rudy M., Gil M. Influence of horse age on carcass tissue composition and horsemeat quality: exploring nutritional and health benefits for gourmets // Applied Sciences. -2023. -Vol.13(20):11293. DOI 10.3390/app132011293.

14. Tehnicheskij reglament Tamozhennogo sojuza TR TS 021/2011. O bezopasnosti pishhevoj produkcii. -Moskva: Evrazijskaja jekonomicheskaja komissija. -2011. -46 s. [in Russian]

15. Produkty pishhevye. Metod vyjavlenija bakterij roda Salmonella: GOST 31659-2012 (ISO 6579:2002). -Moskva: Gosstandartinform. - 2014. -25 s. [in Russian]

16. Produkty pishhevye. Metody vyjavlenija i opredelenija kolichestva bakterij gruppy kishechnyh palochek (koliformnyh bakterij): GOST 31747-2012. - Moskva: Gosstandartinform. - 2013. -16 s. [in

Russian]

17. Ben-David A., Davidson C.E. Estimation method for serial dilution experiments// Journal of Microbiological Methods. -2014. -Vol.107. -P. 214–221. DOI 10.1016/j.mimet.2014.08.023.

18. Erkmen O. Gram staining technique // Laboratory Practices in Microbiology. -2021. -P.99–105. DOI 10.1016/b978-0-323-91017-0.00028-7.

19. Kostanova A., Baytukenova S., Baytukenova S., Ryspaeva U., Yussupova G., Shadyarova Z., Bekakhmetov A. Impact of combined ultrasound and citric acid treatments on the quality and safety of natural horse casings over storage durations // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. -2025. -Vol 75(1). -P.37- 48. DOI 10.31883/pjfns/200346.

20. Siró I., Vén Cs., Balla Cs., Jónás G., Zeke I., Friedrich L. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat //Journal of Food Engineering. -2009. -Vol.91(2). -P.35- 362. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2008.09.015.

Information about the authors

Baytukenova Sh. - candidate of technical sciences, associate professor, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: baytukenova75@mail.ru;

Kostanova A. - PhD student, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: anel_kostanova@mail.ru;

Baytukenova S. - candidate of technical sciences, associate professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: saule7272@mail.ru.

Сведения об авторах

Байтукенова Ш. - кандидат технических наук, ассоциированный профессор, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина», Астана, Казахстан, e-mail: baytukenova75@mail.ru;

Костанова А.- докторант, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина», Астана, Казахстан, e-mail: anel_kostanova@mail.ru;

Байтукенова С. - кандидат технических наук, ассоциированный профессор, АО «Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова», Астана, Казахстан, e-mail: saule7272@mail.ru.

ҒТАМР 65.09.05 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1225**

ЙОГУРТ, БАЛДЫРКӨК ҰНТАҚТАРЫМЕН НЫҒАЙТЫЛҒАН МАКАРОН ӘЗІРЛЕУ БОЙЫНША ЗЕРТТЕУЛЕР

[1]А.Ә. Тоқтабек, [1]Л.А. Мамаева, [2]Hülya Gül, [3]А.Е. Отуншиева, [4]М.Д. Алибекова

[1]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан,
[2]Süleyman Demirel University, Isparta, Türkiye,
[3]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,
[4]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент, Қазақстан,

Корреспондент-автор: aijan700@mail.ru

Макарон өнімдерінің ең көп тұтынатын азық-түлік өнімі екені айтылған. Қазіргі таңда азық-түлік өнеркәсібінде маңызды бағыттардың бірі болып саналады. Мұндай өнімдердің дамуы халықтың денсаулығына зиян келтірмеу үшін дәмді және пайдалы тағамдарды ұсыну мақсат қояды. Макарон өнімдері пайдалы өнімдерді алу үшін жаңа макарон өнімдерін өндірудегі кейбір негізгі қиындықтарды қарастырады. Тағамдық макарон өнімдерінің жолдарын әзірлеу. Макарон өнімдерін өндірудің негізгі шикізаты бидай ұны мен су болып табылады, ал қосымша шикізатқа әр-түрлі байытқыш қоспалар (жұмыртқа, йогурт, балдыркөк ұнтақтары) жатады. Тағамдық және денсаулыққа пайдалы қасиеттері бар макарон өнімдерін жасау технологиясы қарастырылады. Зерттеу барысында дәстүрлі бидай ұнына йогурт, балдыркөк ұнтақтары қосу арқылы, функционалдық құрамы байытылған макарон өнімінің рецептурасы ұсынылды. Йогурт ұнтағы өнімнің ақуыздық құрамын арттырып, пайдалы микроэлементтермен толықтырды, сондай-ақ өнімнің дәмі мен иісіне жағымды әсер етті. Алынған макарон үлгісі ГОСТ 14849-89 стандартына сай пішінін сақтап, қайнатқаннан кейін ыдырамаған және жабыспаған. Сенсорлық талдау нәтижелері бойынша дайын өнімнің органолептикалық көрсеткіштері жоғары бағаланды. Зерттеу нәтижесінде денсаулыққа пайдалы әрі тағамдық құндылығы жоғары макарон өнімін дайындаудың тиімді жолы анықталды.

Түйін сөздер: макарон өнімдері, қатты бидай, нығайтылған макарон, тағамдық қасиеттер, йогурт ұнтағы, рецептура, балдыркөк ұнтағы.

RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF PASTA ENRICHED WITH YOGURT AND CELERY POWDER

[1]A.A. Toktabek, [1]L.A. Mamayeva, [2]Hülya Gül, [3]A.E. Otunshiyeva, [4]M.D. Alibekova

[1]Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan,
[2]Suleyman Demirel University, Isparta, Türkiye,
[3]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
[4]M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan,
e-mail: aijan700@mail.ru

It is said that pasta is the most consumed food product. Nowadays, it is considered one of the most important directions in the food industry. The development of such products aims to provide tasty and healthy dishes without harming the health of the population. Pasta products consider some of the main difficulties in the production of new pasta products in order to obtain healthy products. Development of ways of dietary pasta products. The main raw materials for the production of pasta products are wheat flour and water, and additional raw materials include various enriching additives (eggs, yogurt, celery powder). The technology of making pasta products with nutritional and health benefits is considered. During the study, a recipe for a pasta product enriched with functional composition was proposed by adding yogurt and celery powder to traditional wheat flour. Yogurt powder increased the protein content of the product, supplemented it with useful microelements, and also had a positive effect on the taste and smell of the product. The obtained pasta sample retained its shape in accordance with the GOST 14849-89

standard, did not disintegrate and did not stick after boiling. According to the results of sensory analysis, the organoleptic indicators of the finished product were highly appreciated. The research revealed an effective way to prepare a healthy and nutritious pasta product.

Keywords*:* pasta, durum wheat, fortified pasta, nutritional information, yogurt powder, recipe, celery powder

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ МАКАРОН, ОБОГАЩЕННЫХ ЙОГУРТОМ И СЕЛЬДЕРЕЕМ ПОРОШКОМ

[1]А.Ә. Тоқтабек✉, [1]Л.А. Мамаева, [2]Hülya Gül, [3]А.Е. Отуншиева, [4]М.Д. Алибекова

[1]Казахский национальный аграрный, исследовательский университет, Алматы, Казахстан,
[2]Университет Сулеймана Демиреля, Испарта, Турция,
[3]Казахский национальный университет им., Аль-Фараби, Алматы, Казахстан, Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
e-mail: aijan700@mail.ru

Макаронные изделия являются наиболее потребляемым продуктом питания. В настоящее время они считаются одним из важнейших направлений в пищевой промышленности. Разработка таких продуктов направлена на обеспечение вкусных и полезных блюд без вреда для здоровья населения. Макаронные изделия рассматривают некоторые из основных трудностей в производстве новых макаронных изделий с целью получения полезных продуктов. Разработка способов диетических макаронных изделий. Основным сырьем для производства макаронных изделий являются пшеничная мука и вода, а дополнительным сырьем являются различные обогащающие добавки (яйца, йогурт, порошок сельдерея). Рассматривается технология изготовления макаронных изделий с питательной и оздоровительной пользой. В ходе исследования была предложена рецептура макаронного изделия, обогащенного функциональным составом путем добавления йогурта и порошка сельдерея к традиционной пшеничной муке. Йогуртовый порошок увеличил содержание белка в продукте, дополнил его полезными микроэлементами, а также оказал положительное влияние на вкус и запах продукта. Полученный образец макаронных изделий сохранил форму в соответствии с ГОСТ 14849-89, не рассыпался и не слипся после варки. По результатам сенсорного анализа органолептические показатели готового продукта получили высокую оценку. В ходе исследований выявлен эффективный способ приготовления полезного и питательного макаронного изделия.

Ключевые слова: макаронные изделия, твердые сорта пшеницы, обогащенные макаронные изделия, питательные свойства, йогуртовый порошок, рецепт, порошок сельдерея.

Кіріспе. Қазіргі таңда, әлем бойынша орын алып отырған бәсекелестік және экономиканың қауіпсіздігін қамтамасыз ету жағдайында елді жоғары сапалы азық-түлік өнімдерімен қамтамасыз ету мәселесі өте өзекті болып отыр. Сондықтан тамақ өнеркәсібі кәсіпорындарының инновациялық дамуы мәселесіне ерекше назар аудару керек, өйткені инновациялар экономиканың барлық салаларында бәсекелестік тұрғысында жетістікке жетуінің маңызды болып табылады. Шетелдік бәсекелестік отандық тамақ өнеркәсібі кәсіпорындарына үнемі өндіріске инновациялар енгізу арқылы өнімдерді жетілдіру қажеттілігін тудырады. Жаңа өнімдерді енгізу кәсіпорындарға өзінің пайдасын сақтап қалуға, ал инновациялық дамуға құйған инвестициялар кәсіпорын шығындарын азайтуға мүмкіндік береді [1]. Сонымен қатар, Қазақстан Республикасында макарон өнімдерін тұтыну Италиядан кейінгі әлемдегі ең жоғары көрсеткіштердің бірі болып қала береді. Сондықтан, Қазақстан Республикасында қалыптасқан жағдайға байланысты қазіргі уақытта кәсіпорындар жоғары өнімділікті сақтап және ресурстарды айтарлықтай үнемдей отырып, өндірілетін өнімнің сапасына үлкен көңіл бөліп, макарон өнімдерін өндірудің жаңа технологияларын жасауға көңіл аудару [2].

Макарон өнімдерінің тағамдық және әлеует-

ті денсаулықты жақсартатын қасиеттерін жақсарту үшін әр-түрлі әдістерді қолдануға болады. Ең қарапайым әдіс макарон өнімдерін көп жылдар бойы коммерциялық түрде қол жетімді тұтас дәнді немесе тұтас астық өнімі ретінде тұтыну болуы мүмкін. Дегенмен, тұтынушылар тазартылған дәндерден немесе ұннан жасалған макарон өнімдерін жақсы көреді, өйткені олардың тұтас дәндер/тұтас дәндермен салыстырғанда денсаулыққа пайдасы аз болғанымен, дәмі, сыртқы түрі және құрылымы жақсы. Макарон өнімдерінің тағамдық қасиеттерін жақсартудың басқа тәсілдеріне олардың оқшауланған функциясы туралы білімге немесе басқа тағамдардағы зерттеулерге негізделген арнайы функцияларды қамтамасыз ету үшін арнайы ингредиенттерді немесе ингредиенттер комбинацияларын қосу кіреді [2]. Ресурстарды үнемдеу, бақылау және оңтайландыру мәселелері алға қойған мақсаттарының бірі, өйткені олар макарон өнімдерін шығаратын кәсіпорындарда қатты бидай ұнын шамадан тыс тұтынумен байланысты. Сонымен қатар, макарон өнімдерін өндірудің технологиялық нормативтік құқықтық базасын жетілдіру және шешу қажет. Бұл мәселелерді шешу технология және стандарттау салаларындағы зерттеулерді қажет етеді. Тамақ өнеркәсібі, оның ішінде макарон өнімдері екі түрлі негізгі құбылыстарға тәуелді болып келеді, өйткені бастапқы шикізаттың сапасына және оны өңдеудегі технологиялық әрекеттердің ерекшеліктеріне көңіл бөледі. Макарон өнімдерін өндіруге арналған басты шикізаттардың біріншісі ұн болып табылады,ал екіншісі су болып саналады. Ал қосымша шикізаттарға әр-түрлі құнарландырғыш және дәмдеуіш қосымша заттарды жатқызуға болады [3].

Соңғы жиырма жылда тамақтанудың адам денсаулығына әсері туралы хабардар болу тұтынушылардың тағамдық қасиеттері жақсартылған тағамға деген қызығушылығын арттырды. Шикізат деп кез-келген өнімді өндіру үшін бастапқы материал қызметін атқаратын, яғни әрі қарай өңдеуге жататын адам еңбегінің объектілері түсіндіріледі. Демек, азық-түлік секторы тағамдық құндылығынан асып түсетін пайдалы қасиеттері бар функционалды тағамдарды зерттеуге және дамытуға баса назар аударды. Шынында да, макарон өнімдері өзінің әмбебаптығы, арзан құны, тағамдық құндылығы және жағымды дәмі арқасында бүкіл әлемде кеңінен тұтынылады, осылайша адам денсаулығына пайдалы әсер ететін функционалды молекулаларды жеткізу үшін қолайлы тасымалдаушы болып табылады. Функционалды ингредиенттерді немесе балама шикізатты пайдалану макарон өнімдерінің пісіру сапасы мен сенсорлық атрибуттарын жиі өзгертеді, нәтижесінде пісіру жоғалуы артады, қаттылығы төмендейді, түс өзгереді және макарон дәмі өзгереді. Сондықтан макарон өнімдерін инновациялау стратегиясы функционалдық ингредиенттерді анықтаудан басқа тұтынушыларға тартымды болу үшін жоғары пісіру және сенсорлық сапаны сақтай отырып, пайдалы қасиеттерін сақтай алатын жаңа макарон өнімдерін алу үшін қолайлы технологиялық процесті қажет етті. Макарон өнімдерінің функционализациясы негізінен қатты бидай жармаларында шектеулі мөлшерде болатын диеталық талшықтармен, антиоксиданттармен, ақуыздармен, витаминдермен және минералдармен байыту арқылы қол жеткізілді. Денсаулығын ойлайтын тұтынушылардың салауатты тағамға деген өсіп келе жатқан сұранысы азық-түлік өндірушілерінің қызығушылығын тудырды. Соңғы онжылдықта өндірушілердің тағамдық құндылығын жақсарту немесе жарманы ішінара немесе толық ауыстыру ретінде болжамды денсаулық пайдасын қамтамасыз ету үшін әр-түрлі ингредиенттермен толықтыру үрдісі болды. Ұнға оңай өңделетін көне дәндер де белгілі бір артықшылықтар бере алады, бірақ олардың функционалдық құндылығының дәлелі онша анық емес.

Денсаулыққа қосымша пайдасы бар макарон өнімдерін тұтынуды арттыру үшін зерттеушілер, өнеркәсіп және тиісті агенттіктер сенсорлық сапаны жақсарту, өңдеу мәселелері (пісіру уақыты), қолжетімділік және аралас медиа хабарламалары сияқты оларды қабылдаудағы кейбір кедергілерді еңсеруі керек.

Макарон - танымал тағам және жоғары қоректік немесе функционалды қосылыстарды қо-

судың жақсы тәсілі екендігі көрсетілген. Ауыстырылатын ингредиенттері бар макарон өнімдерінің жақсы технологиялық сапасы мен тұтынушыға қолжетімді болуын қамтамасыз ету керек. Сондықтан мұндай өнімдерді өндіруші тиімді болуы керек және өндіруші мұндай өнімдерді дайындамас бұрын, сондай-ақ әлеуетті нарыққа дейін қажетті ингредиенттің дайын жеткізілімін қамтамасыз етуі керек. Белсенді қосылыстар мен ақуыз матрицасы арасындағы өзара әрекеттесу кебек, инулин, еритін талшық және төзімді крахмал сияқты кейбір ингредиенттер үшін жақсы түсініледі. Макарон өнімдерінің сапасына әсер ететін жекелеген қосылыстар арасындағы синергизм немесе өзара әрекеттесу туралы бірнеше зерттеулер ғана қарастырылған. Дегенмен, көптеген елдердің заңнамасы төмен GI, холестеринді төмендететін, жүрекке пайдалы және т.б. сияқты тағамға қатысты денсаулыққа шағым жасамас бұрын дәлелдеуді талап етеді. Осы себепті денсаулықтың нақты пайдасын растау үшін адам клиникалық сынақтары арқылы ең перспективалы функционалды макарон өнімдерін бағалау үшін көбірек зерттеулер қажет. Қол жетімді баға бойынша жақсы дәмі, құрылымы және сыртқы түрі бар денсаулық туралы мәлімдемелер тұтынушылардың мұндай тағамдарға сұранысын арттыруға көмектеседі.

Материалдар мен әдістер. Ғылыми негізделген рецептура бойынша дайындалған макарон өнімдерінің йогурт ұнтағымен нығайтылған макарон әзірлеу бойынша зерттеулер үшін сынамалар алынды. Макарон өнімдерін өндіруге арналған рецептура әзірленді және қамырдың технологиялық қасиеттері зерттелді. Ұн қоспасының тағамдық құндылығын, реологиялық қасиеттерін, илеу ұзақтығын және макарон қамырын престеу жылдамдығын анықтау әдістемесі бойынша химиялық құрамын анықтау (ақуыздың массалық үлесі, крахмал және талшық мөлшері, күл мөлшері) инфрақызыл анализатордың көмегімен жүзеге асырылды (1-сурет) [3,4].

Макарон өнімдеріне йогурттан бес сынама (К1,А1,А2,А3 және А4) құрамында тек бидай ұны (100%) бар бақылау ретінде К1 үлгісі қолданылды, ал А1, А2, А3 және А4 үлгілері әр-түрлі концентрациядағы бидай ұны мен йогурт ұнтағы арқылы дайындалды, тура сол тәрізді балдыркөк ұнтақтарын қосу арқылы әр-түрлі концентрациядағы бидай ұны мен балдыркөк ұнтағын қосу арқылы Б1, Б2, Б3, Б4 және құрамында тек бидай ұны (100%) бар бақылау ретінде К1 үлгісі тәрізді 5 сынама дайындалып олардың сапасына эксперименттер жүргілді. Қатты бидайдан жасалған йогурт және балдыркөк ұнтақтарын қосу арқылы макарон өнімдерінің тағамдық сапасын жақсарту үшін орасан зор әлеуетке ие. Барлық сынамалар құрамы 11г жұмыртқа, 35мл су негізінде жасалынды.



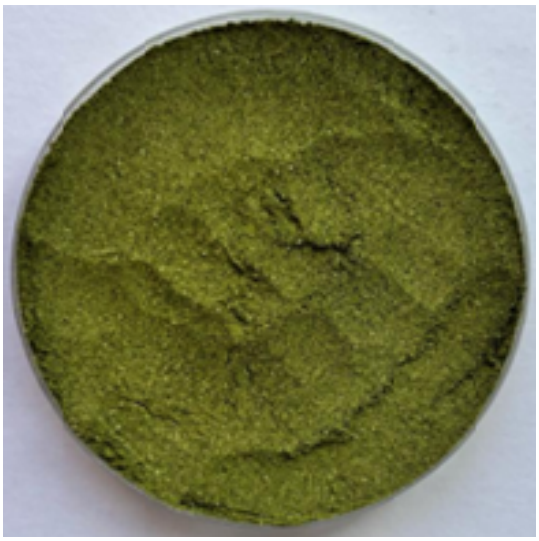
1-сурет. Инфраскан ”Кан”

Макарон өнімдеріне йогурт ұнтағын және балдыркөк ұнтағын қосу арқылы сапасын айтарлықтай жақсарта алады. Йогурт ұнтағы-бұл құрғақ күйінде болатын, дайын болған кезде сумен немесе басқа сұйықтықтармен араластырылғанда йогурт түрінде дайындалатын өнім. Ол көбінесе өндіру процесін жеңілдету, сақтау мерзімін ұзартып, тасымалдау мен сақтау шарттарын жақсарту үшін қолданылады. Балдыркөк ұнтағы- бұл құрғақ күйінде дайындалған және ұнтақталған балдыркөк өсімдігінің өнімділігі. Ол көбінесе тағамдарға дәм қосу, дәмдік қасиеттерін арттыру, сонымен қатар дәрумендер мен минералдарға бай болу мақсатында қолданылады (2-сурет).

Алынған макарон өнімдерінің үлгілері нормативтік құжаттарда белгіленген қауіпсіздік талаптарына сәйкес келеді [5-9] және көрсеткіштер рұқсат етілген шектік мөлшерден аспайды, яғни бұл өнімдер қауіпсіз деп бағаланады.

Жүргізілген зерттеулер бойынша макаронның беріктігін (durability) немесе қаттылығын (hardness) анықтай отырып, осы көрсеткіштер негізінде тағам өнімінің сапасын, тұтынушы қабылдауын және өндірістік стандарттарға сәйкестігін бағалауға мүмкіндік аламыз.

Макарон өнімдеріне йогурт ұнтағын және балдыркөк ұнтағын қосу арқылы дайындалған сынамалар құрамы мен концентрациясы 1 және 2 кестедегідей мәндерге ие болды.



Балдыркөк ұнтағы



Йогурт ұнтағы

2 - сурет. Йогурт және балдыркөк ұнтақтарынның жалпы көрінісі

1-кесте. Макарон өнімдеріне йогурт ұнтағын қосу арқылы дайындалған сынамалар құрамы мен концентрациясы

№	Сынама №	Құрамын-дағы бидай ұны, %	Құрамындағы йогурт ұнтағы, %	Ені	Биіктігі	Пісіру уақыты	Салмағы
1	А1	90	10	5,8	2,3	22 мин 28сек	25,48г
2	А2	85	15	6,1	2,0	14 мин 18сек	25,13г
3	А3	80	20	6,1	2,1	11 мин 56 сек	25,16г
4	А4	70	30	-	-	-	-
5	К1	100	-	5,8	2,3	23 мин 43 сек	25,20г

Мұнда А4 сынама бойынша қамыр макарон жасауға болмайды. Өйткені оның икемдігілі және жабысқақтығы өте жоғары.

Зерттеу Stable Micro Systems (Англия) фирмасының текстуралық анализаторын қолданумен жүзеге асырылды. Stable Micro Systems (Англия) фирмасының текстуралық анализаторлары қатты заттардың, тұтқыр сұйықтықтардың, ұнтақтардың және түйіршікті материалдардың реологиялық қасиеттерін зерттеу үшін іргелі, эм-

пирикалық және имитациялық сынақтарды жүргізуге мүмкіндік береді. Сынақтар қысу немесе созу арқылы сынақ үлгісіне бір реттік немесе циклдік әсер ету арқылы жүзеге асырылады. Сынақ кезінде деформацияға әсер ету керек күш уақыттың әрбір сәтінде сынақ аяқталуының белгіленген сәтіне дейін өлшенеді. Нәтижелерді алу бойынша макарон өнімдеріне сынама жүргізу сәті (3-сурет)

2-кесте. Макарон өнімдеріне балдыркөк ұнтағын қосу арқылы дайындалған сынамалар құрамы мен концентрациясы

№	Сынама №	Құрамын-дағы бидай ұны, %	Құрамындағы балдыркөк ұнтағы, %	Ені	Биіктігі	Пісіру уақыты	Салмағы
1	Б1	98,5	1,5	5,8	2,1	18мин 06 сек	25,01г
2	Б2	97	3	5,8	2,2	18 мин 32 сек	25,21г
3	Б3	95,5	4,5	6,0	2,1	15 мин 48 сек	25,10г
4	Б4	94	6	6,0	2,0	13 мин 25 сек	25,15г
5	К1	100	-	5,8	2,3	30 мин 43 сек	25,20г



3 - сурет. Макарон өнімдеріне сынама жүргізу сәті

Нәтижелер және талқылау. Алынған тәуелділіктер үлгілердің қаттылығын, серпімділігін, беріктігін, тұтқырлығын, аққыштығын, консистенциясын және басқа реологиялық параметрлерін бағалауға мүмкіндік береді.

Бұл құрылғының ерекшелігі - олардың әмбебаптығы (жаңа әзірлемелер үшін де, халықаралық стандарттарға сәйкес тестілеу үшін де пайдалану мүмкіндігі) және ең дәл нәтижелерді алуға және үлгілердегі ең аз айырмашылықтарды алуға мүмкіндік береді. Анализаторда үлгілердің физикалық және химиялық қасиеттерін бағалау кезінде зертханаларда қолданудың кең ауқымы үшін қосымшалардың үлкен таңдауы бар.

Макарон өнімдерінің үлгілері (А1, А2, А3 және А4) 100:00 қатынасында қатты бидай ұны мен йогурт ұнтағының әр-түрлі концентрациясын пайдалана отырып дайындалды; 90:10; тиісінше 85:15, 80:20, 70:30. Әрбір жағдайда дайындалған макаронның мөлшері тиісті құрамның 500г болды. Қалыптың алдыңғы жағы дайын өнімнің ұзындығы әрбір үлгі үшін 4см болатындай етіп реттелді. Соңғы өнімді кептіру макарон үлгісі пеште 55ºС температурада 1 сағат ұсталды. Кептірілген өнім полиэтилен пакеттерге оралған. Кептірудің негізгі мақсаты үлгідегі ылғалдылықты шамамен 12-13% дейін төмендету болды. Әр-түрлі үлгідегі өнімдер тығыздығы

ғы жоғары полиэтилен пакеттерге оралған. Алынған кептірілген өнімдер пісіру уақыты, суды талдау, ылғалдылық, құрылым және сенсорлық талдау сияқты қосымша зерттеулер үшін пайдаланылды [10].

Макарон өнімдерінің сапасын зерттеу кезінде тұтынушылық қасиеттерінің жиынтығы, тағамдық құндылығы және өнімдердің мақсаттарға жарамдылығы анықталды. Өнімдердің органолептикалық қасиеттері:дәмі, түсі, иісі, сыртқы түрі. Ылғалдылығын, қышқылдығын, дәмі мен иісін, пісіргеннен кейінгі макаронның жайкүйін анықтау және макарон өнімдерін қабылдау және әзірленген макарон өнімдерінің сапа көрсеткіштері бойынша талдаудан өтті.

Ылғалдың массалық үлесі (W) формула арқылы есептеледі:

$$W = \frac{(m_1 - m_2)}{m} * 100 \qquad (1)$$

Мұндағы: m_1- кептіру алдында талдауға арналған сынама бөтелкесінің салмағы, г;

m_2 - кептіргеннен кейін талдауға арналған сынама бөтелкесінің салмағы, г;

m- талдауға арналған үлгінің массасы, г

$$W = \frac{(1,4669 - 0,7715)}{0,7976} \times 100 = 87,186 \qquad (2)$$

$$W = \frac{(1,4189 - 0,7694)}{0,7542} \times 100 = 88,117 \qquad (3)$$

(2) формула бойынша келтірілген 98,5 г ұн, 1,5г балдыркөк ұнтағы және (3) формула бойынша 90 г ұн, 10 г йогурт ұнтағын қолданылды.

Ылғалдылық тұрақты массаға дейін кептіру әдісі арқылы анықталып, есептеу осы формула бойынша жүргізілді [11].

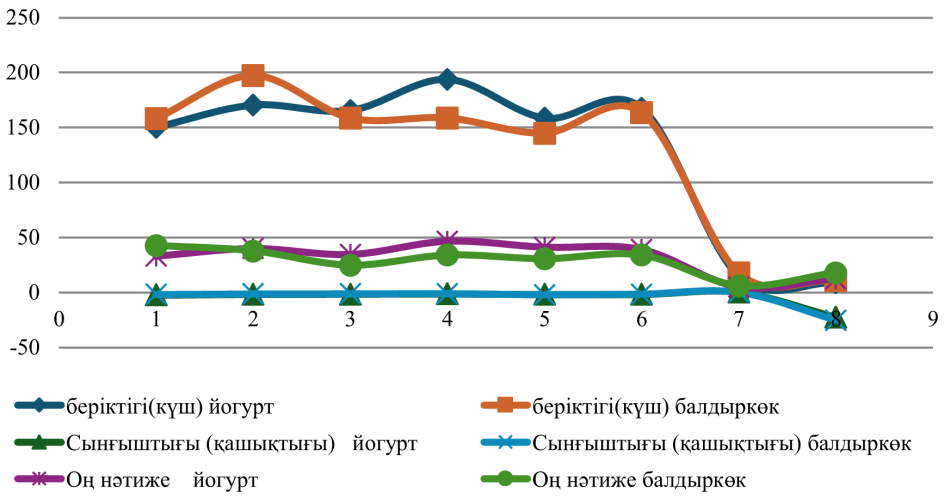
Макарон өнімдерінің пісіру қасиеттері пісірілгенге дейін пісіру ұзақтығына, пісіру кезінде сіңірілген судың мөлшеріне, қайнаған суға өткен құрғақ заттардың мөлшеріне, пісірілген бұйымдардың пішінінің сақталуына қарай бағаланды. Пісірудің ұзақтығы дайын болғанға дейін қайнаған суға салынғаннан бастап ұнды, пісірілмейтін қабат жоғалып кеткенге дейінгі уақыт аралағында болып саналады.Ыдыстан өнімнің бір бөлігін алып, екі шыны әйнектің арасына қою керек.Макарон өнімдерінің пісіру аяқталғаннан кейін макарон ыдыстың үстінде ұсталған сүзгіге ауыстырылды. Артық су ағып болғаннан кейін, сыртқы тексеру арқылы бұйымдардың пішінін сақталуы белгіленді.

Үлгілердің сапасы AACC 2000 стандартына сәйкес ең аз пісіру уақытымен анықталды. Макарон өнімдерінің пісіру немесе кептіруден кейінгі механикалық қасиеттерін анықтау: беріктік, сынғыштық, оң нәтиже және т.б. (4-сурет).

Ұннан жасалған макарон өнімдеріне арналған шикізаттың желімдеу қасиеттерін анықтау үшін жылдам тұтқырлық анализаторы (RVA) пайдаланылды [12]. Өнімнің құрылымы тұрақты микрожүйелік текстура анализаторы TA-XT көмегімен анықталды. Ол макарон үлгісін кесуге қажетті күшті жазу үшін кесу режимінде пайдаланылды. Әрбір макарон үлгісі тот баспайтын болаттан жасалған табада бөлек дайындалған, әрбір жағдайда салмағы 25 г үлгі алынып, 500 мл суда қайнатылған. Макарон қайнаған суға қосылып, алдын ала белгіленген уақытқа қайнатылды. Макарон түсі, құрылымы, хош иісі, дәмі және жалпы қолайлылығы бойынша бағаланды [13,14].

3-кесте. Макарон өнімдерінің су белсенділігін (aw) анықтау

№	Үлгі атауы	Нәтиже	°C	Тестілеу әдістемесі
1	98,5 г ұн, 1,5г балдыркөк ұнтағы	0,325	28,8	ISO 18787:2017
2	90 г ұн, 10 г йогурт ұнтағы	0,302	30,6	



4-сурет. Макарон өнімдерінің пісіру немесе кептіруден кейінгі механикалық қасиеттерін анықтау: беріктік, сынғыштық, оң нәтиже және т.б.



5 - сурет. LabSwift-aw су белсенділігі анализаторы

3-кестеде - Макарон өнімдерінің су белсенділігін (aw) LabSwift-aw су белсенділігі анализаторы - зертханада да, тікелей өндірісте де сұйық және қатты үлгілердің барлық түрлерінің су белсенділігін өлшеуге арналған портативті құрылғы көрсетілген (5-сурет). Йогурт ұнтағы қосылған макарон өнімдерінің ылғалдылығын анықтау барысы (6-сурет)

Қолдану аймақтары: Нан және ұннан жасалған кондитерлік өнімдер; үлпек, жарма, қытырлақ нан, чипсы; шай, кофе; ұнтақтар, дәмдеуіштер, кептірілген өнімдер; құрғақ мал азығы; құрғақ сүт, құрғақ сүт өнімдері; косметикалық және фармацевтикалық өнімдер.

Үлгі № 1 - Нәтижені талдау және интерпретация

Көрсеткіш	Мәні	Интерпретация
Су белсенділігі (aw)	0.325	Өте төмен. Микробтар, ашытқылар, зең өсе алмайды
Температура	28,8°C	Өлшеу үшін қолайлы. Нақты мән алынған
Өнім ылғалдылығы	төмен	Суға бай емес, бұл сақтау тұрақтылығын арттырады

Үлгі № 2 - Нәтижені талдау және интерпретация

Көрсеткіш	Мәні	Интерпретация
Су белсенділігі (aw)	0.302	Өте төмен. Микробтардың ешқайсысы тіршілік ете алмайды
Температура	30,6°C	Жоғарырақ, бірақ aw өлшеуге қолайлы

Өнім ылғалдылығы	төмен	Суға бай емес, бұл сақтау тұрақтылығын арттырады

4-кесте - Макарон өнімдерінің ылғалдылығын анықтау

№	Үлгі атауы	кептіру алдында талдауға арналған сынама бөтелкесінің салмағы (г)	кептіргеннен кейін талдауға арналған сынама бөтелкесінің салмағы (г)	талдау үшін үлгі массасы (г)
1	98,5 г ұн, 1,5г балдыркөк ұнтағы	1,4669	0,7715	0,7976
2	90 г ұн, 10 г йогурт ұнтағы	1,4189	0,7694	0,7542



6 - сурет. Йогурт ұнтағы қосылған макарон өнімдерінің ылғалдылығын анықтау барысы

Қорытынды. Сонымен қорытындылай келе, Қазақстан Республикасының аумағында макарон йогурт ұнтағының әр-түрлі пропорцияларын қолдану арқылы дайындалды. Нәтижелерді йогурт концентрациясын жоғарылату талшықтың құрамын арттырып, пісіру уақытын қысқартқанын, ал макарон өнімдерінің жұмсақтығы бақылау үлгісіне қарағанда жоғарылағанын көрсетті. Қоспаларды алу үшін шикізат ретінде йогурт, балдыркөк ұнтақтары алынды. Бидай ұны ішінара алмастыратын 1,5% балдыркөк ұнтағы және 10% ұнтағын қосу арқылы макарон өнімдерін витаминдер мен минералдармен байыту арқылы ұлт денсаулығын жақсарту мәселелерін шешуге көмектеседі, ресурстарды үнемдеуді (қатты бидай) қамтамасыз етеді, өнім желісін кеңейтеді, нарықтық стандарттау мен қолжетімді бағаға байланысты өндірістің бәсекеге қабілеттілігі мен экономикалық тиімділігін арттыруға ықпал етеді.

Әдебиеттер

1. Толысбаев Б.С., Сейсинбинова А.А. Қазақстан Республикасындағы тамақ өнеркәсібі кәсіпорындарының инновациялық дамуы: проблемалары мен перспективалары// Экономика: стратегия и практика. -2019. -Т.1 (14). - Б.109-122.

2. Шаймерденова Д.А., Омаралиева А.М., Тарабаев Б.К., Сарбасова Л.Т., Ануарбекова С.С., Искакова Д.Б., Шаймерденов А.А., Тастанов Д.А. Производство обогащенных макаронных изделий комплексом нанокарбоксилатов и тонкодисперсным порошком зерновых культур// Вестник КазУТБ. -2024. -№ 3(24). - С.430-442. DOI 10.58805/kazutb.v.3.24-407.

3. Нұрдан Д.Н. Дәстүрлі емес ұнды шикізаттан жасалған макарон өндірісі технологиясының нормативтік қамтамасызданuы: PhD 8D07501 -”Стандарттау және сертификаттау” мамандығы бойынша-салалар бойынша) /Алматы. - 2024. - 172 б.

4. Искакова Г.К. Технология макаронного производства: Сырье и материалы. Учебное пособие//Алматы: «Полиграфия-сервис и Ко». -2014. -208 с. ISBN 978-601-263-251-4

5. СТ РК ГОСТ Р 51865-2010. Макаронные изделия. Общие технические условия/Астана. - 2010. - 56 с.

6. ГОСТ ISO 17718-2015. Зерно и мука из мягкой пшеницы. Определение реологических свойств теста в зависимости от условий замеса и повышения температуры/ Стандартинформ. -2015. -32 с.

7. ГОСТ 14849-89 Правила приемки и методы определения качества/ ИПК Издательство стандартов. -1996.

8. ТР ТС 021/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции»/ЕЭК. -2011.

9. ГОСТ 31743-2017 Изделия макаронные.Общие технические условия/Стандартинформ. -2017.

10. Bauziane M., Cappa C., Moles A., Brandolini A., Hidalg A., et al. Effect of alkaline salts and whey protein isolate on the quality of rice-maize gluten-free pasta//LWT. -2024. -Vol.191: 115623. DOI 10.1016/j.lwt.2023.115623.

11. ГОСТ 31964-2012 Изделия макаронные. Правила приемки и методы определения качества/Стандартинформ. -2014.

12. Boudalia S., Gueroui Y., Boualem B., Bousbia A., Benada M., Leksir C., Mezroua Y., Zemmouchi K.R., Saoud A., Chemmam M. Evaluation of Physicochemical Properties and Sensory Qualities of Pasta Enriched with Freeze-Dried Sweet Whey// Scientia Agriculturae Bohemica. -2020. -Vol. 51(3). -P.75- 85. DOI 10.2478/sab-2020-0010.

13. Osipova G.A., Koryachkina S.Y., Koryachkin V.P., Seregina T.V., Zhugina A. Effects of protein-containing additives on pasta quality and biological value// Foods and Raw Materials. -2019. -Vol.7(1). -P. 60-66. DOI 10.21603/2308-4057-2019-1-60-66.

14. Marco M., Michela V., Carlo G.R., Erica P. Design of a Plant-Based Yogurt-Like Product Fortified with Hemp Flour: Formulation and Characterization// Foods. -2023. -Vol. 12 (3): 485. DOI 10.3390/foods12030485.

References

1. Tolysbaev B.S., Sejsinbinova A.A. Қazaқstan Respublikasyndaғy tamaқ өnerkәsibi kәsiporyndarynyң innovacijalyқ damuy: problemalary men perspektivalary// Jekonomika: strategija i praktika. -2019. -T.1 (14). - B.109-122. [in Kazakh]

2. Shajmerdenova D.A., Omaralieva A.M., Tarabaev B.K., Sarbasova L.T., Anuarbekova S.S., Iskakova D.B., Shajmerdenov A.A., Tastanov D.A. Proizvodstvo obogashhennyh makaronnyh izdelij kompleksom nanokarboksilatov i tonkodispersnym poroshkom zernovyh kul’ tur// Vestnik KazUTB. -2024. -№ 3(24). - S.430-442. DOI 10.58805/kazutb.v.3.24-407. [in Russian]

3. Nұrdan D.N. Dәstұrli emes ұndy shikizattan zhasalғan makaron өndirisi tehnologijasynyң normativtik қamtamasyzdanuy: PhD 8D07501 -”Standarttau zhәne sertifikattau” mamandyғy bojynsha-salalar bojynsha) /Almaty. - 2024. - 172b. [in Kazakh]

4. Iskakova G.K. Tehnologija makaronnogo proizvodstva: Syr’ e i materialy. Uchebnoe posobie//Almaty: «Poligrafija-servis i Ko». -2014. -208 s. ISBN 978-601-263-251-4. [in Russian]

5. ST RK GOST R 51865-2010. Makaronnye izdelija. Obshhie tehnicheskie uslovija/Astana. - 2010. - 56 s. [in Russian]

6. GOST ISO 17718-2015. Zerno i muka iz mjagkoj pshenicy. Opredelenie reologicheskih svojstv testa v zavisimosti ot uslovij zamesa i povyshenija temperatury/ Standartinform. -2015. -32 s. [in Russian]

7. GOST 14849-89 Pravila priemki i metody opredelenija kachestva/ IPK Izdatel' stvo standartov. -1996. [in Russian]

8. TR TS 021/2011 Tehnicheskij reglament Tamozhennogo sojuza «O bezopasnosti pishhevoj produkcii»/EJeK. -2011. [in Russian]

9. GOST 31743-2017 Izdelija makaronnye.Obshhie tehnicheskie uslovija/Standartinform. -2017. [in Russian]

10. Bauziane M., Cappa C., Moles A., Brandolini A., Hidalg A., et al. Effect of alkaline salts and whey protein isolate on the quality of rice-maize gluten-free pasta//LWT. -2024. -Vol.191: 115623. DOI 10.1016/j.lwt.2023.115623.

11. GOST 31964-2012 Izdelija makaronnye. Pravila priemki i metody opredelenija kachestva/Standartinform. -2014. [in Russian]

12. Boudalia S., Gueroui Y., Boualem B., Bousbia A., Benada M., Leksir C., Mezroua Y., Zemmouchi K.R., Saoud A., Chemmam M. Evaluation of Physicochemical Properties and Sensory Qualities of Pasta Enriched with Freeze-Dried Sweet Whey// Scientia Agriculturae Bohemica. -2020. -Vol. 51(3). -P.75- 85. DOI 10.2478/sab-2020-0010.

13. Osipova G.A., Koryachkina S.Y., Koryachkin V.P., Seregina T.V., Zhugina A. Effects of protein-containing additives on pasta quality and biological value// Foods and Raw Materials. -2019. -Vol.7(1). -P. 60-66. DOI 10.21603/2308-4057-2019-1-60-66.

14. Marco M., Michela V., Carlo G.R., Erica P. Design of a Plant-Based Yogurt-Like Product Fortified with Hemp Flour: Formulation and Characterization// Foods. -2023. -Vol. 12 (3): 485. DOI 10.3390/foods12030485.

Авторлар туралы мәлімет

Тоқтабек А.Ә. - PhD докторанты, ҚазҰАЗУ, Алматы, Қазақстан, e-mail: aijan700@mail.ru;

Мамаева Л.А. - биология ғылымдарының кандидаты, қауым.профессор, ҚазҰАЗУ, Алматы, Қазақстан, e-mail: laura.mamaeva@mail.ru;

Hülya Gül - доктор профессор, Сулейман Демирел университеті, Испарта, Түркия, e-mail: hulyagul@sdu.edu.tr;

Отуншиева А.Е. - PhD докторанты, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан, e-mail: 03.08.1990.43@mail.ru;

Алибекова М.Д. - магистр, оқытушы., М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент, e-mail:alibekova.malika@bk.ru.

Information about the authors

Toktabek A.A. - PhD student, KazNARU, Almaty, Kazakhstan, e-mail: aijan700@mail.ru;

Mamayeva L.A. - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, KazNARU, Almaty, Kazakhstan, e-mail: laura.mamaeva@mail.ru;

Hülya Gül - Dr. Professor, Süleyman Demirel University, Isparta, Türkiye, e-mail: hulyagul@sdu.edu.tr;

Otunshiyeva A.E. - PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: 03.08.1990.43@mail.ru;

Alibekova M.D. - master' s student, teacher, M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: alibekova.malika@bk.ru.

ҒТАМР 65.63.29 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1118**

ЛАКТОЗАСЫ ТӨМЕН ФУНКЦИОНАЛДЫҚ СҮТТІ СУСЫННЫҢ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

[1]Ш.Ж. Жасқайрат✉, [1]Н.С. Машанова, [2]Д.С. Жаксыгалиева, [1]М.Е. Бекболатова

[1]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан,
[2]Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан

✉ *Корреспондент-автор: shynarai_92@mail.ru*

Бұл мақалада адамның дұрыс тамақтану қажеттілігіне сәйкес лактозасы төмен функционалдық сүт өнімін өндіру технологиясын талдау нәтижелері көрсетілген. Талдау нәтижелері бойынша дайын сүт өнімінің органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері сиыр сүтінің көрсеткіштерімен салыстыра отырып анықталды, яғни сыртқы түрі біркелкі, консистенциясы біртекті, иіс пен дәм бойынша сүтке тән дәм, ащы емес, біркекі ақ түске ие. Дайын өнімнің физика-химиялық көрсеткіштері: тығыздығы - 28,77 *кг*/м^3, қышқылдығы - 19 °Т, ақуыз – 3,09 г, лактоза – 0,1 г. Сиыр сүтіне лактаза ферменті мен әртүрлі мөлшердегі теңіз балдыры қосылып, төрт үлгі дайындалды. Зерттеу нәтижесінде 0,02 % теңіз балдыры қосылған сүт үлгісі органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері бойынша оңтайлы деп танылды.

Түйін сөздер: сүт, лактоза, фермент, теңіз балдыры, физика-химиялық көрсеткіштер, органолептикалық көрсеткіштер.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОЛОЧНОГО НАПИТКА С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЛАКТОЗЫ

[1]Ш.Ж. Жасқайрат✉, [1]Н.С. Машанова, [2]Д.С. Жаксыгалиева, [1]М.Е. Бекболатова

[1]Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, Астана, Казахстан,
[2]Западно-Казахстанский аграрно-технический университет, Уральск, Казахстан,
e-mail: shynarai_92@mail.ru

В данной статье отражены результаты анализа технологии производства малофункциональной молочной продукции с низкой лактозой в соответствии с потребностями человека в здоровом питании. По результатам анализа органолептические и физико-химические показатели готовой молочной продукции определены в сравнении с показателями коровьего молока, то есть имеют равномерный внешний вид, однородную консистенцию, характерный для молока вкус по запаху и вкусу, не горький, а несколько белый. Физико-химические показатели готовой продукции: плотность - 28,77 кг/м^3, кислотность - 19 ° Т, белок - 3,09 г, лактоза - 0,1 г. К коровьему молоку добавлены фермент лактазы и различные дозы морских водорослей, изготовлено четыре образца. В результате исследования образец молока с добавлением 0,02 % морских водорослей был признан оптимальным по органолептическим и физико-химическим показателям.

Ключевые слова: молоко, лактоза, фермент, морские водоросли, физико-химические показатели, органолептические показатели.

DEVELOPMENT OF A FUNCTIONAL LOW-LACTOSE DAIRY BEVERAGE TECHNOLOGY

[1]Sh.Zh. Zhaskairat✉, [1]N.S. Mashanova, [2]D.S. Zhaksygalieva, [1]M.E. Bekbolatova

[1]Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan,
[2]Khan Zhangir West-Kazakhstan agrarian technical University, Uralsk, Kazakhstan,
e-mail: shynarai_92@mail.ru

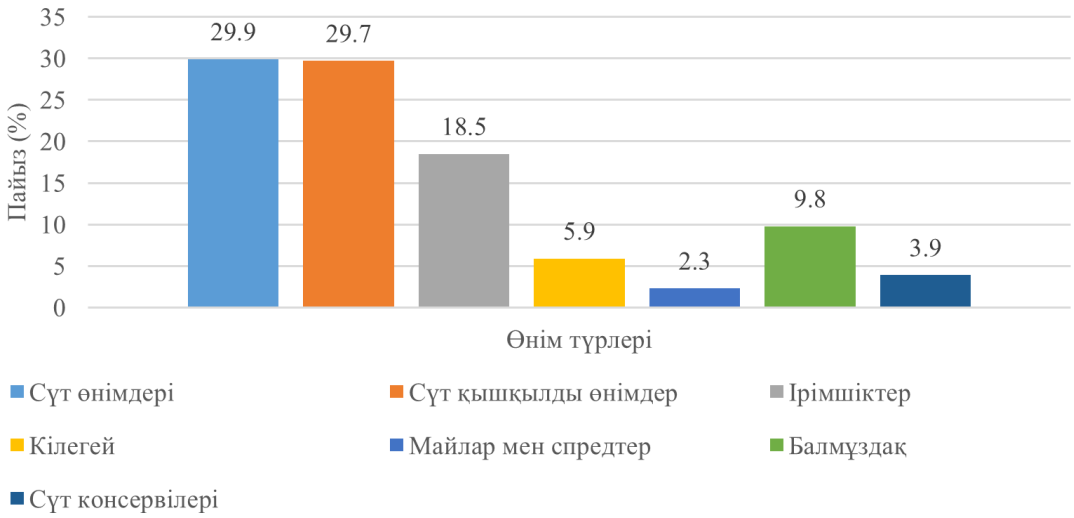
This article presents the results of the analysis of the production technology of low-functional dairy products with low lactose in accordance with the human need for healthy nutrition. Based on the results of the analysis, the organoleptic and physicochemical indicators of the finished dairy products were

determined in comparison with the indicators of cow' s milk, that is, they have a uniform appearance, homogeneous consistency, a characteristic milk taste in smell and taste, not bitter, but somewhat white. Physicochemical indicators of the finished product: density – 28,77 kg / m^3, acidity - 19 ° T, protein – 3,09 g, lactose – 0,1 g. Lactase enzyme and various doses of seaweed were added to cow' s milk, four samples were made. As a result of the study, the milk sample with the addition of 0,02 % of seaweed was recognized as optimal in terms of organoleptic and physicochemical indicators.

Key words: milk, lactose, enzyme, seaweed, physicochemical parameters, organoleptic parameters.

Кіріспе. Адамның дұрыс тамақтануы үшін құрамы теңдестірілген, өсімдік ингредиенттерімен байытылған функционалды сүт өнімдерін өндіру технологиясын жасау өзекті мәселе болып табылады. Функционалды тамақ өнімдері, соның ішінде лактозасы аз және лактозасыз тамақ өнімдері құрамында физиологиялық функционалды тағамдық ингредиенттердің болуына байланысты адамның денсаулығын сақтауға, жақсартуға және аурулардың алдын алуға көмектесетін пайдалы тағам өнімі [1].

Адамдардың едәуір бөлігі ферментопатияның көбеюіне байланысты сүт өнімдерін тұтына алмайды. Төмен лактозалы сүт өнімдерінің құрамында лактоза мөлшері аз болуымен қатар, тағамдық сипаттамалары бойынша кәдімгі лактозасы бар сүт өнімдеріне ұқсас болуы тиіс. Сондықтан осындай тағам өнімдерін өндірушілер тұтынушылардың қажеттіліктері мен қабылдау ерекшеліктерін мұқият зерделеуі қажет.1-суретте қазіргі әлемдік нарықта төмен лактозалы өнімдердің көптеген түрлері ұсынылған: ішуге арналған сүт, сүтті өнімдер, ірімшік, балмұздақ, сүт консервілері және т.б. өнімдер көрсетілген.



1-сурет. Төмен лактозалы өнімдердің өнім түрі бойынша ассортимент құрылымы, %

Соңғы уақытта төмен лактозалы және лактозасыз сүт өнімдеріне сұраныс әлемдік деңгейде қарқынды өсуде. Мысалы, Dairy Global (2023) деректері бойынша төмен лактозалы өнімдер нарығы жыл сайын шамамен 7-9 %өсіп отыр, ал Еуропа мен Солтүстік Америка елдерінде мұндай өнімдердің үлесі жалпы сүт өнімдерінің 25 %-ына жетті.

Қазіргі уақытта сүт шикізатындағы лактоза мөлшерін төмендету үшін әртүрлі әдістер қолданылуда. Олардың ішінде: лактаза ферментін пайдалану арқылы ферментативті гидролиз; баромембраналық сүзу; хроматографиялық тазарту; сүттің түрлі микро және макрокомпонентерін сарысу ақуызы, казеин немесе казецитпен біріктіру және т.б. әдістер [2- 4].

Шетелдік ғалымдардың зерттеулерінде төмен лактозалы өнімдерді өндіруде β-галактозидаза ферментін пайдалану, сондай-ақ мембраналық сүзу және ферментативтік гидролиз әдістері тиімді деп танылған. Мысалы, Knudsen L.J. et al. (2024) зерттеуінде гидролиз әдісінің түрі мен ферменттің табиғаты лактозаны ыдырату тиімділігіне және өнімнің дәмдік қасиеттеріне елеулі әсер ететіні дәлелденген [5].

Titov E.I. және әріптестері (2020) лактаза типіне байланысты гидролиз тиімділігін зерттеп, β-галактозидаза қолдану арқылы лактозаны 98 %-ға дейін азайтуға болатынын көрсетті [6].

O' Sullivan A.M. et al. (2014) теңіз балдырларының сүт өнімдерінің функционалдық қасиеттерін күшейтетін табиғи ингредиент екенін дәлелдеді [7].

Orzuna-Orzuna J.F. және т.б. (2024) зерттеуінде теңіз балдырларын сүт сиырларының рационына енгізу сүт өнімдерінің сапалық құрамын арттыратыны және экологиялық әсерін төмендететіні көрсетілген [8].

Сонымен қатар, Mummah S. et al. (2014) зерттеуінде шикі және төмен лактозалы сүтті тұтынудың лактозаға төзбеушілік белгілерін айтарлықтай төмендететіні анықталған [9].

Осы халықаралық зерттеулер төмен лактозалы өнімдердің физиологиялық және технологиялық артықшылықтарын дәлелдейді және бұл бағыттағы ғылыми-зерттеу жұмыстарын одан әрі дамытудың өзектілігін арттырады.

Зерттеудің мақсаты - лактозасы төмен функционалды сүт сусынын өндіру технологиясын әзірлеу және теңіз балдырлары қосылған өнімнің органолептикалық және физика-химиялық қасиеттерін бағалау.

Зерттеудің гипотезасы: теңіз балдырларын аз мөлшерде (0,02 %) қосу өнімнің құрылымдық-тұтқырлық қасиеттерін және тағамдық құндылығын жақсартады, ал лактаза ферментін пайдалану сүттегі лактоза мөлшерін едәуір төмендетеді.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу нысаны ретінде С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университетінің «Сүтті қайта өңдеу экспериментттік-өндірістік цехында» өндірілген сиыр сүтінен сүт сарысуы алынды. Зерттеу нысандары:

- стерильденген сүт, майлылығы 2,5%;
- пастерленген сүт, майлылығы 3,9%;
- балғын сүт;
- лактаза ферменті

Жұмыс барысында қолданылатын барлық компоненттер қолданыстағы нормативтік-техникалық құжаттаманың талаптарына сәйкес.

Бұл жұмыста шикізаттар мен дайын өнімнің қасиеттерін зерттеу үшін органолептикалық, физико-химиялық зерттеу әдістері қолданылды.

1. Сүттің органолептикалық қасиеттерін анықтау МЕМСТ 28283-2015 стандартына сайкес анықталды.

Сүттің түсін анықтау. Өлшеу цилиндрінде әр типтегі 50 мл сүт өлшеніп, химиялық шыныға құйылды.Ақ фондық экранды қолдана отырып, әр үлгінің түсі анықталды.

Сүттің иісін анықтау. Әр үлгі 20 мл су моншасында 35 ^{0}С температураға дейін қыздырылды.

Сүттің дәмін анықтау.1, 2, 3 және 4 үлгідегі сүттің дәміне бағалау жүргізілді. Шикі сүттің дәмін бағалау (3) санитарлық-гигиеналық ережелерге сәйкес жүргізілді.

2. Сүттің физика-химиялық қасиеттерін анықтау.

Сүт және сүт өнімдерінің тығыздығын анықтау. Сүттің тығыздығы МЕМСТ Р 54758-2011 стандартына сай ареометрде анықталды. Сүт бөлме температурасына дейін қыздырылып, біркелкі араластырылды. Цилиндрге 250 мл сүт құйылып, сүт температурасы өлшенеді. Ареометр сүтке батырылып, еркін жүзу күйінде қалдырылады да ареометр шкаласы бойынша тығыздық көрсеткіші анықталады.

3. Сүт және сүт өнімдерінің қышқылдығын анықтау. Сүттің қышқылдығы МЕМСТ Р 54669-2011 стандартына сай анықталды. Бюретка нарий гидроксидінің ерітіндісімен (0,1н) толтырылып, оның деңгейін нөлдік бөліністе орнатты. Сыйымдылығы 100 мл конустық колбаға 10

мл сүт өлшеніп, үстіне 20 мл дистилденген су мен үш тамшы фенолфталеин тамызылды. Қоспа мұқият араластырылып, колбаны сол қолмен ұстап, оның құрамын жеңіл айналмалы қозғалыспен үздіксіз араластыра отырып, 1 минут ішінде жоғалып кетпейтін сәл қызғылт бояу пайда болғанға дейін 0,1 н натрий гидроксиді ерітіндісімен бір тамшыдан тамызылды. Тернер градусындағы сүттің қышқылдығын анықтау үшін 10 мл сүтті титрлеуге жұмсалған сілтінің (мл) көлемі 10-ға көбейтілді, яғни 100 мл өнімге қайта есептелді.

4. Сүт және сүт өнімдерінің құрамындағы ақуызды анықтау МЕМСТ 34536-2019 стандартына сай жүргізілді. Колбаларға 5 мл сүт құйылып, әрқайсысына 5 тамшы сірке қышқылы ерітіндісі тамызылды. Әрі қарай оны 40-45 °С температураға дейін су моншасында қыздырып, центрифугада (8000-10000 айн./мин) 10 минут бойы айналдырды. Нәтижесінде сүттің тұнбасы байқалды, содан кейін ерітінді қағаз сүзгісі арқылы сүзілді. Сүзгіде сүзбе тұнбасы қалды, ол пробиркаға салынып, 3 тамшы концентрацияланған азот қышқылы тамызылды. Сәйкесінше ақуыздардың тұнбада болуы ашық сары түстің пайда болуымен анықталды.

5. Сүт және сүт өнімдерінің құрамындағы лактозаны анықтау МЕМСТ 34304-2017 стандартына сай анықталды. Алдыңғы тәжірибеде алынған фильтрат фенолфталеин индикаторы бойынша натрий гидроксиді ерітіндісімен бейтараптандырылды. Фильтрат екі жартыға бөлінді. Таза пробиркаға 2 мл натрий гидроксиді ерітіндісі құйылды және көк түсті мыс (II) гидроксиді тұнбасы пайда болғанға дейін мыс(II) сульфатының ерітіндісі тамшылап қосылды. Алынған қоспа шайқалып, оған фильтраттың бірінші жартысын қосқанда, ашық көк түстің пайда болуы фильтратта лактоза бар екенін көрсетті. Қыздырылған кезде ерітіндінің түсі қызылға өзгерді. Пробирка қабырғаларында карамель иісі бар қоңыр тұнбаның пайда болуы лактозаның болуын көрсетеді.

6. Сүт және сүт өнімдерінің құрамындағы С дәруменінің мөлшерін анықтау. Аскорбин қышқылын анықтаудың йодометриялық әдісі қолданылды. Крахмал ерітіндісі дайындалды: 1 г крахмалды суық суға сұйылтып, бір стакан қайнаған суға құйып, шамамен 1 минут қайнатады. Йод ерітіндісі дайындалды: йод концентрациясы 5% болатын дәріханалық йод ерітіндісін сумен 40 рет сұйылтып 0,125% ерітінді алынды.20 мл сүт өлшеніп, 100 мл көлемге дейін сумен сұйылтылды.1 мл крахмал ерітіндісін құйып, оған 1 тамшы йод ерітіндісі қосылды.10-15 с ішінде тұрақты көк түстің пайда болуы сүтте аскорбин қышқылының болуын көрсетеді.

Нәтижелер мен талқылау. Төмен лактозалы сүт тек жоғары сапалы санаттағы сүттен жасалады. Алдымен сиыр сүтін тазартады, майлылығы 2,5% дейін май бойынша қалыпқа келтіреді, 15±2 МПа қысымда бір сатылы гомогенизациядан өтеді, 76±2 °С температуралық режиммен 15-20 с пастерленеді, одан кейін 4±2°С дейін салқындатылады.



а **ә** **б** **в**

2-сурет. Төмен лактозалы сүт сусынын өндірудің технологиялық процесі

Сүттің сапасын тексеріліп, кейін шикізат салқындатқыш арқылы үлкен қалыпқа келтіру танктеріне түседі. Оған лактаза ферменті және үккіштен өткізілген нори теңіз балдыры қосылады. Функционалдық ингредиент ретінде нори теңіз балдырлары таңдалды, себебі олардың құрамында биологиялық белсенді заттар - полисахаридтер, минералды элементтер және антиоксиданттар бар. Теңіз балдырлары ас қорыту жүйесінің микрофлорасын қалыпқа келтіруге ықпал ететін пребиотикалық қасиетке ие.

Төмен лактозалы сүтті сусын құрамына теңіз балдырларын қосу өнімнің функционалдық бағытын күшейтумен қатар, оңтайлы мөлшерде қолданылған жағдайда органолептикалық қасиеттерінің айтарлықтай нашарлауына әкелмейді.

1 а, ә, б, в - суретте төмен лактозалы сүт сусынын өндірудің технологиялық процесі көрсетілген.

Функционалдық қасиетті жоғарылату мақсатында сүтке теңіз балдырларының тұнбалары қосылып дайындалғандығы туралы көптеген ғалымдардың мақалаларынан көруге болады [7, 9]. Төмен лактозалы сүт сусынын өндірудің қажетті мөлшері 1-кестеде көрсетілген.

1-кесте. Өнімнің рецептурасы (л/100 г)

Атаулары	Мөлшері
Сиыр сүті, 3,2 %	1 л
«Лактаза» ферменті	0,3 г
Ұнтақталған теңіз балдыры	0,2 г



3-сурет. Төмен лактозалы сүт сусынының 4 үлгісі

2-кесте. Төмен лактозалы сүт сусынының 4 үлгісін дайындау мөлшері

Үлгі	Атаулары	Мөлшері, %
№1	Бақылау үлгісі	-
№2	Ұнтақталған теңіз балдыры	0,01
№3	Ұнтақталған теңіз балдыры	0,02
№4	Ұнтақталған теңіз балдыры	0,04

Лотте Дж. Кнудсен және т.б. ғалымдар сүтке лактаза ферментін қосып, лактозаны гидролиздеу әдістерін сипаттаған [10]. Талдау үшін төмен лактозалы сүт сусынының 4 үлгісі дайындалды. Бақылау үлгісі 100 мл сүтке әртүрлі арақатынаста қосылды. Бақылау үлгісі ретінде фермент пен теңіз балдыры қосылмаған пастерленген сиыр сүті (майлылығы 3,2 %) пайдаланыл-

ды. Бұл үлгі дайын өнімнің табиғи сипаттамаларымен салыстыру үшін эталон ретінде алынды. Дайындалған үлгілердің мөлшері 2-кестеде көрсетілген.

Барлық талдаулар кемінде үш қайталаумен жүргізілді. Әрбір үлгі бойынша үш параллель анықтама алынып, орташа мән ± стандартты ауытқу (SD) есептелді. Статистикалық өңдеу Excel бағдарламасының Analysis ToolPak модулімен жүзеге асырылды. Айырмашылықтардың сенімділігі Student t-критерийімен ($p<0,05$) анықталды. Зертханалық жағдайда тәжірибе үлгісі мен бақылау үлгілері алынып, талданды. Өнімнің органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштері сыртқы түрі, консистенция, иіс пен дәм бойынша салыстыра анықталды.3-ші кестеде төмен лактозалы сүт сусынының органолептикалық бағалау нәтижелері келтірілген.

3-кесте. Төмен лактозалы сүт сусынының органолептикалық бағалау нәтижелері

Көрсеткіш атауы	**Бақылау үлгісі**	№ **1**	№ **2**	№ **3**
Консистенциясы және сыртқы түрі		Біртекті теңіз балдырының бөлшектері бар	Біртекті теңіз балдырының бөлшектері бар	Біртекті теңіз балдырының бөлшектері бар
Дәмі және иісі	Төмен лактозалы сүт дәмі	Балдырдың дәмі сезілмеді	Балдырдың дәмі кішкене сезіледі	Балдырдың дәмі қатты,дәмі ауызда қалады
Түсі	Ақ түсті	Ақ түсті	Ақ түсті	Ақ түсті,балдыр ұнтақтары көрінеді

Дайын өнімнің органолептикалық көрсеткіштері С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университетінің Тамақ және қайта өңдеу өндірісінің технологиясы кафедрасының меңгерушісіне, оқытушыларына дегустация жүргізіп, 0,02 % қатынасында дайындалған төмен лактозалы сүт сусынын оңтайлы деп анықталды. Себебі зерттеу нәтижелері бойынша теңіз балдырларын 0,02 % мөлшерде қосу ең оңтайлы нұсқа екені анықталды. Бұл дозировкада сусын жоғары органолептикалық көрсеткіштермен, тұрақты физика-химиялық параметрлермен және жақсы құрылымдық қасиеттермен сипатталды. Теңіз балдырларының 0,01 % мөлшері функционалдық әсердің жеткіліксіздігімен ерекшеленсе, 0,04 % деңгейінде қосу сусынның дәмі мен консистенциясының нашарлауына және қышқылдықтың шамадан тыс артуына алып келді. Айырмашылықтардың сенімділігі – $p < 0,05$ деңгейінде есептелді.

Зерттелетін сусын үлгілері (4 ± 2) °С температурада 7 тәулік бойы сақталды. Зерттеулер сақтау мерзімінің 1-, 3- және 7-күндері жүргізілді. Органолептикалық бағалау 7 сарапшыдан тұратын дегустациялық комиссиямен жүргізілді. Бағалау бейтарап жарықтандырылған бөлмеде, ауа температурасы 20-22 °С жағдайында өткізілді. Сусынның дәмі, иісі, түсі және консистенциясы 5 балдық шкала бойынша бағаланды. Барлық тәжірибелер үш реттік қайталанымда орындалды. Алынған нәтижелер вариациялық статистика әдістері арқылы өңделіп, орташа мәні мен стандартты ауытқуы есептелді.

Зерттеу барысында органолептикалық, физика-химиялық және микробиологиялық көрсеткіштерді таңдау функционалдық сүтті сусындарға қойылатын талаптарға негізделді. Органолептикалық көрсеткіштер (дәмі, иісі, түсі және консистенциясы) өнімнің тұтынушылық қасиеттерін бағалауда негізгі рөл атқарады. Қышқылдықты (°Т) анықтау ашыту процесінің қарқындылығын, өнімнің тұрақтылығын және сақтау

барысында сапасының өзгеруін бағалауға мүмкіндік береді. Лактоза мөлшерін анықтау ашыту тиімділігін растау және өнімнің «лактозасы төмен» санатына сәйкестігін дәлелдеу үшін жүргізілді.

Зерттелген көрсеткіштер функционалдық сүт өнімдерінің қауіпсіздігі мен сапасына қойылатын талаптарды регламенттейтін ТР ТС 033/2013 «Сүт және сүт өнімдерінің қауіпсіздігі туралы» техникалық регламентіне сәйкес таңдалды. Кестелерде көрсетілген деректер өнім үлгілерінің барлық мәндер үшін МЕМСТ Р 53590-2009 және МЕМСТ 31761-2012 сәйкестігін көрсетеді.4 - кестеде теңіз балдыры қосылған төмен лактозалы сүттің органолептикалық көрсеткіштері көрсетілген.

4-кесте. Теңіз балдыры қосылған төмен лактозалы сүттің органолептикалық көрсеткіштері

Көрсеткіштер	№2 тәжірибелік үлгісінің жалпы сипаттамасы
Сыртқы түрі мен консистенциясы	Біркелкі
Дәмі мен иісі	Таза, сүтке тән дәм
Түсі	Ақ түсті, біркелкі

Теңіз балдыры қосылған төмен лактозалы сүттің органолептикалық көрсеткіштеріне тоқталсақ, өнімнің сыртқы түрі біркелкі, консистенциясы біртекті, иіс пен дәм бойынша сүтке тән дәм, ащы емес, біркекі ақ түске ие болды.5 - кестеде теңіз балдыры қосылған төмен лактозалы сүттің физика-химиялық көрсеткіштері көрсетілген.

5-кесте. Теңіз балдыры қосылған төмен лактозалы дайын сүттің физика-химиялық көрсеткіштері

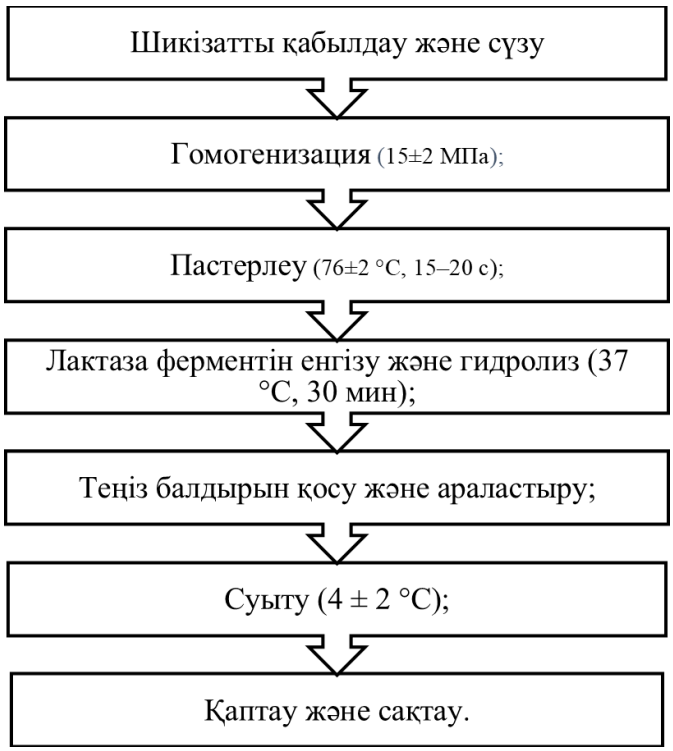
Көрсеткіштер	МЕМСТ 31450-2013 стандарты бойынша майлылығы 1,5 % сиыр сүті	Теңіз балдыры қосылған төмен лактозалы сүті
Тығыздығы,/м^3	1027-1029 /м^3	28,77 /м^3 ± 0,12
Құрғақ зат, %	8,2 %	8,37 %
Қышқылдығы, °Т	21 °Т	19 °Т ± 0,4
Майлылығы, г	1,5 г	1,1 г ± 0,1
Қосылған су, г/л	1,5 г/л	0 г/л ± 0,01
Ақуыздар, г	3,0 г	3,09 г ± 0,001
Температура, °С	4 ± 2 °С	4 ± 2 °С ± 0,01
Лактоза, г	4,9 г	0,1 г ± 0,1

Кестедегі зерттеу нәтижесі бойынша зерттеу үлгісінде МЕМСТ 31450-2013 стандарты бойынша майлылығы 1,5 % сиыр сүті мен теңіз балдыры қосылған төмен лактозалы сүттің физика-химиялық көрсеткіштері көрсетілген. Ферментация процесі барысында сусындағы лактоза мөлшерінің айтарлықтай төмендегені байқалды, бұл қолданылған ферменттің тиімділігін дәлелдейді. Ашыту аяқталғаннан кейін өнімнің лактоза мөлшері төмен лактозалы сүт өнімдеріне қойылатын талаптарға сәйкес келді.

Теңіз балдырлары мөлшерінің артуы титрле-

нетін қышқылдықтың біртіндеп жоғарылауына әсер етті, бұл олардың биологиялық белсенді компоненттерінің ашыту процесіне ықпал етуімен түсіндіріледі. Нәтижесінде теңіз балдыры қосылған төмен лактозалы сүттің құрамындағы лактоза мөлгері 0,1 г тең, бұл лактозаға төзбеушілікпен ауыратын адамдар үшін ұсынылған нормаға сәйкес келуін дәлелдейді.

Төмен лактозалы сүт сусынын өндіру технологиялық схемасы келесі негізгі сатылардан тұрады:



1 - сұлба. Төмен лактозалы сүт сусынын өндіру технологиялық сұлбасы

Қорытынды. Зерттеу тақырыбы бойынша ғылыми-техникалық әдебиеттер мен патенттік ақпараттар талданды және жүйеленді. Функционалдық бағытта шикізат таңдалды. Құрамы мен қасиеттері зерттелді. Төмен лактозалы сүт сусынының рецептурасы әзірленді. Зерттеу нәтижелері төмен лактозалы сүт сусынын өндіруде 0,02 % теңіз балдыры мен лактаза ферментін пайдалану өнімнің органолептикалық және физика-химиялық қасиеттерін жақсартатынын көрсетті. Алынған нәтижелер гипотезаны растады: теңіз балдырлары өнімнің құрылымдық және тағамдық сипаттамаларын тұрақтандырды, ал лактаза ферменті лактозаны 98 %-ға дейін ыдыратты. Болашақта өнімнің сақтау мерзімін, микробиологиялық тұрақтылығын және тұтынушылардың қабылдау деңгейін зерттеу жоспарлануда.

Әдебиеттер

1. Дмитриева И.Е., Иванова Л.А., Донская Г.А. Разработка синбиотического кисломолочного продукта с биологически активной растительной добавкой. Биотехнология и продукты биоорганического синтеза: Сборник материалов национальной научно-практической конференции/ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств». - 2018. -С.189-192.

2. Антипова Т.А., Фелик С.В., Симоненко С.В., Кудряшова О.В. Получение низколактозного молока для специализированных продуктов детского питания / Т. А. Антипова, // Пищевая промышленность. -2020. -№ 10.- С.41-46. DOI 10.24411/0235-2486-2020-10105.

3. Данильчук Т.Н., Ганина В.И., Головин М.А. Низколактозные молочные продукты пути получения / Молочная промышленность. - 2013. -№ 11. - С. 41-42.

4. Трушина Ю.В. Применение фермента «Lacta-free» при получении низколактозных продуктов / Молочнакя промышленность. -2014. -№ 11. -С. 31-32.

5. Knudsen L.J., Rauh V., Pedersen J.N., Dekker P., Otzen D.E., Larsen L.B., Nielsen S.D. Insight into protein crosslinking and casein polymerization in pre- and posthydrolyzed lactose-free ultra-high-temperature milk during long-term storage//Journal of Dairy Science. -2024. -Vol.107(12). -P.10497-10511. DOI 10.3168/jds.2024-25103.

6. Titov E.I., Tikhomirova N.A., Nguyen B.C., et al. Research of lactose hydrolysis depending on the type of the enzyme // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. -2020. -Vol.548 (8):082040. DOI 10.1088/1755-1315/548/8/082040.

7. O’ Sullivan A. M. et al. An examination of the potential of seaweed extracts as functional ingredients in milk// International Journal of Dairy Technology. -2014. –Vol.67(2). -P. 182-193. DOI 10.1111/1471-0307.12121.

8. Orzuna-Orzuna J.F., Lara-Bueno A., Mendoza-Martínez G. D., Miranda-Romero L. A., Vázquez Silva G., de la Torre-Hernández M. E., Sánchez-López N., Hernández-García P. A. Meta-Analysis of Dietary Supplementation with Seaweed in Dairy Cows: Milk Yield and Composition, Nutrient Digestibility, Rumen Fermentation, and Enteric Methane Emissions // Dairy. -2024. -Vol.5(3). -P.464-479. DOI 10.3390/dairy5030036.

9. Mummah S., Oelrich B., Hope J., Vu Q., Gardner C.D. Effect of raw milk on lactose intolerance: a randomized controlled pilot study // Annals of Family Medicine. -2014. -Vol.12(2). -P.134-141. DOI 10.1370/afm.1618.

10. Knudsen L.J., Nielsen S.D-H., Dekker P., Otzen D.E., Rauh V., Larsen L.B. Impact of hydrolysis method and lactase preparation on proteolysis and glycation in long-term stored lactose-hydrolysed UHT milk // International Dairy Journal. -2024. -Vol.154:105946. DOI 10.1016/j.idairyj.2024.105946.

References

1. Dmitrieva I.E., Ivanova L.A., Donskaja G.A. Razrabotka sinbioticheskogo kislomolochnogo produkta s biologicheski aktivnoj rastitel’ noj dobavkoj. Biotehnologija i produkty bioorganicheskogo sinteza: Sbornik materialov nacional’ noj nauchno-prakticheskoj konferencii/ FGBOU VO «Moskovskij gosudarstvennyj universitet pishhevyh proizvodstv». - 2018. -S.189-192. [in Russian]

2. Antipova T.A., Felik S.V., Simonenko S.V., Kudrjashova O.V. Poluchenie nizkolaktoznogo moloka dlja specializirovannyh produktov detskogo pitanija / T. A. Antipova, // Pishhevaja promyshlennost’. -2020. -№ 10.- S.41-46. DOI 10.24411/0235-2486-2020-10105. [in Russian]

3. Danil’ chuk T.N., Ganina V.I., Golovin M.A. Nizkolaktoznye molochnye produkty puti poluchenija / Molochnaja promyshlennost’. - 2013. -№ 11. - S.41-42. [in Russian]

4. Trushina Ju.V. Primenenie fermenta «Lacta-free» pri poluchenii nizkolaktoznyh produktov / Molochnakja promyshlennost’. -2014. -№ 11. -S.31-32. [in Russian]

5. Knudsen L.J., Rauh V., Pedersen J.N., Dekker P., Otzen D.E., Larsen L.B., Nielsen S.D. Insight into protein crosslinking and casein polymerization in pre- and posthydrolyzed lactose-free ultra-high-

temperature milk during long-term storage//Journal of Dairy Science. -2024. -Vol.107(12). -P.10497-10511. DOI 10.3168/jds.2024-25103.

6. Titov E.I., Tikhomirova N.A., Nguyen B.C., et al. Research of lactose hydrolysis depending on the type of the enzyme // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. -2020. -Vol.548 (8):082040. DOI 10.1088/1755-1315/548/8/082040.

7. O' Sullivan A. M. et al. An examination of the potential of seaweed extracts as functional ingredients in milk// International Journal of Dairy Technology. -2014. –Vol.67(2). -P. 182-193. DOI 10.1111/1471-0307.12121.

8. Orzuna-Orzuna J.F., Lara-Bueno A., Mendoza-Martínez G. D., Miranda-Romero L. A., Vázquez Silva G., de la Torre-Hernández M. E., Sánchez-López N., Hernández-García P. A. Meta-Analysis of Dietary Supplementation with Seaweed in Dairy Cows: Milk Yield and Composition, Nutrient Digestibility, Rumen Fermentation, and Enteric Methane Emissions // Dairy. -2024. -Vol.5(3). -P.464-479. DOI 10.3390/dairy5030036.

9. Mummah S., Oelrich B., Hope J., Vu Q., Gardner C.D. Effect of raw milk on lactose intolerance: a randomized controlled pilot study // Annals of Family Medicine. -2014. -Vol.12(2). -P.134-141. DOI 10.1370/afm.1618.

10. Knudsen L.J., Nielsen S.D-H., Dekker P., Otzen D.E., Rauh V., Larsen L.B. Impact of hydrolysis method and lactase preparation on proteolysis and glycation in long-term stored lactose-hydrolysed UHT milk // International Dairy Journal. -2024. -Vol.154:105946. DOI 10.1016/j.idairyj.2024.105946.

Авторлар туралы мәлімет

Жасқайрат Ш.Ж. - т.ғ.м., докторант, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: shynarai_92@mail.ru;

Машанова Н.С. - техника ғылымдарының докторы, аға оқытушы, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: nurmashanova@gmail.com;

Жаксыгалиева Д. С. - т.ғ.м., аға оқытушы, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық технологиялық университеті, Орал, Қазақстан, e-mail: dariga_aidos@mail.ru;

Бекболатова М.Е. - т.ғ.м., докторант, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: mariambekbolatova93@gmail.com.

Information about the authors

Zhaskairat Sh. Zh. - PhD student, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: shynarai_92@mail.ru;

Mashanova N.S. - Doctor of Technical Sciences, Senior Lecturer, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: nurmashanova@gmail.com;

Zhaksygalieva D.S. - Senior Lecturer, Master of Technical Sciences, Zhangir Khan West-Kazakhstan agrarian technical University, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: dariga_aidos@mail.ru;

Bekbolatova M.E. - PhD student, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: mariambekbolatova93@gmail.com.

МРНТИ 61.13.15 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1232**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ СТЕНДА ДЛЯ АДСОРБЦИОННО-ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ОТ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ СОРБЕНТОВ

А.К. Базанова, А.К. Какимов, Н.К. Ибрагимов, М.М. Ташыбаева
«Шәкәрім университеті», Семей, Казахстан
Корреспондент-автор: arayka.bazanovak@mail.ru

В данной работе исследуется параметры функционирования экспериментальной установки адсорбционно-фильтрационной очистки жидких пищевых продуктов от токсичных веществ с использованием природных сорбентов (цеолита, шунгита и кокосового активированного угля). Установка представляет собой напорную систему с тремя сорбционными колоннами, которые могут включаться индивидуально или в различных комбинациях, что позволяет варьировать режимы фильтрации. В ходе эксперимента изучалось влияние объёма сорбентов (50, 100, 150 и 200 мл по шкале мерного стакана) и мощности насоса (135, 200 и 245 Вт), а также самотёчного режима на скорость процесса. Экспериментальные данные показали, что оптимальные результаты достигаются при мощности насоса 200 Вт с использованием цеолита (вторая колонна) и кокосового активированного угля (третья колонна), обеспечивающих наименьшее время фильтрации при сохранении высокой эффективности очистки. Наиболее эффективными сорбентами оказались цеолит и кокосовый активированный уголь, отличающиеся развитой пористой структурой и высокой удельной поверхностью. Самотёчный режим показал наименьшую эффективность. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения природных сорбентов для повышения безопасности жидких пищевых продуктов и могут быть использованы при проектировании промышленных систем предварительной очистки.

Ключевые слова: адсорбционно-фильтрационный стенд, фильтрация, адсорбция, природные сорбенты, токсичные вещества, пищевая безопасность.

STUDY OF THE OPERATING PARAMETERS OF THE STAND FOR ADSORPTION-FILTRATION PURIFICATION FROM TOXIC SUBSTANCES BASED ON NATURAL SORBENTS

A.K. Bazanova, A.K. Kakimov, N.K. Ibragimov, M.M. Tashybayeva
«Shakarim University», Semey, Kazakhstan,
e-mail: arayka.bazanovak@mail.ru

This article investigates the operating parameters of an experimental adsorption-filtration unit for the purification of liquid food products from toxic substances using natural sorbents (zeolite, shungite, and coconut-based activated carbon). The unit is designed as a pressure system with three sorption columns that can be operated individually or in various combinations, allowing for flexible adjustment of filtration modes. The experiments examined the effect of sorbent volume (50, 100, 150, and 200 ml according to the measuring scale) and pump power (135, 200, and 245 W), as well as gravity flow mode, on the filtration rate. The results demonstrated that the most efficient performance was achieved at a pump power of 200 W with the use of zeolite (second column) and coconut activated carbon (third column), providing the shortest filtration time while maintaining high purification efficiency. Zeolite and coconut activated carbon proved to be the most effective sorbents due to their developed porous structure and high specific surface area. The gravity flow mode showed the lowest efficiency. The findings confirm the feasibility of applying natural sorbents to improve the safety of liquid food products and their potential use in the design of industrial systems for preliminary purification.

Keywords: adsorption-filtration unit, filtration, adsorption, natural sorbents, toxic substances, food safety.

ТАБИҒИ СОРБЕНТТЕР НЕГІЗІНДЕ УЛЫ ЗАТТАРДАН АДСОРБЦИЯЛЫҚ-ФИЛЬТРАЦИЯЛЫҚ ТАЗАРТУ СТЕНДІ ЖҰМЫСЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

А.Қ. Базанова✉, А.К. Кәкімов, Н.К. Ибрагимов, М.М. Ташыбаева

«Шәкәрім университеті», Семей, Қазақстан,
e-mail: arayka.bazanovak@mail.ru

Бұл зерттеу жұмысында табиғи сорбенттерді (цеолит, шунгит және кокос қабығынан алынған белсендірілген көмір) қолдана отырып, сұйық тағам өнімдерінен улы (зиянды) заттарды адсорбциялық-фильтрациялық тазартуға арналған эксперименттік қондырғының жұмыс параметрлері зерттелді. Қондырғы үш сорбциялық бағандардан тұратын қысымдық жүйе, оларды жеке немесе түрлі комбинацияларда қосу арқылы фильтрация режимдерін өзгертуге мүмкіндік береді. Эксперимент жүргізу барысында сорбенттердің көлемі (50, 100, 150 және 200 мл өлшеуіш стақан шкаласы бойынша) және сорғы қуаты (135, 200 және 245 Вт), сондай-ақ өздігінен ағу жұмыс режимінің процестің жылдамдығына әсері зерттелді. Эксперименттік көрсеткіштер негізінде, оңтайлы нәтижелер 200 Вт сорғы қуатында, цеолитті (екінші баған) және кокос қабығынан алынған белсендірілген көмірін (үшінші баған) қолданғанда алынды, бұл жағдайда фильтрация уақыты ең төмен болып, тазарту тиімділігі жоғары деңгейде сақталды. Ең тиімді сорбенттер цеолит пен кокос қабығынан алынған белсендірілген көмір болып шықты, олар кеуекті құрылымымен және жоғары меншікті бетімен ерекшеленеді. Өздігінен ағу жұмыс режимі ең төмен тиімділікті көрсетті. Алынған нәтижелер сұйық тағам өнімдерінің қауіпсіздігін арттыру үшін табиғи сорбенттерді қолданудың мақсатқа сай екенін дәлелдейді және өнеркәсіптік алдын-ала тазарту жүйелерін жобалауда пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: адсорбциялық-фильтрациялық стенд, фильтрация, адсорбция, табиғи сорбенттер, улы (зиянды) заттар, тағам қауіпсіздігі.

Введение. Эффективным подходом к снижению токсичных веществ в жидких пищевых продуктах являются адсорбционно-фильтрационные процессы. В связи с этим актуальным представляется использование природных сорбентов, отличающихся меньшей стоимостью по сравнению с коммерческими аналогами, а также высокой эффективностью и экологической безопасностью [1]. Фильтрованием называют процесс разделения суспензий с использованием пористых перегородок, которые задерживают твёрдую фазу суспензии и пропускают её жидкую фазу. Разделение суспензии, состоящей из жидкости и взвешенных в ней твёрдых частиц, производят при помощи фильтра, который в простейшем виде является сосудом, разделённым на две части фильтровальной перегородкой. Процесс адсорбции заключается в том, что твёрдое вещество (адсорбент) удерживает на своей поверхности один или несколько компонентов из газа или раствора [2]. В результате на поверхности адсорбента образуется слой адсорбата. Притяжение обусловлено как силами Ван-дер-Ваальса, так и взаимодействиями, основанными на гидрофобном отталкивании [3]. Адсорбция является эффективным методом удаления токсичных веществ из жидких пищевых продуктах. Метод отличается рядом преимуществ по сравнению с альтернативными технологиями очистки:

- низкая стоимость строительства и эксплуатации очистных систем;

- высокая эффективность при удалении концентрированных загрязнителей;

- возможность регенерации сорбента и повторного использования;

- способность к адсорбции многокомпонентных смесей веществ [4].

Радиационная опасность во многом связана с загрязнением питьевой воды и пищевых продуктов радионуклидами и тяжёлыми металлами, что представляет собой актуальную проблему пищевой безопасности [5]. Цель работы-исследовать параметры функционирова-

ния адсорбционно-фильтрационной установки с применением природных сорбентов. Экспериментальная установка, представленная в исследовании, обеспечивает эффективную адсорбционную очистку жидких пищевых продуктов и способствует повышению их безопасности.

Материалы и методы. С целью исследования адсорбционных свойств была использована экспериментальная установка, сконструированная на кафедре «Биоинженерных систем» университета Шәкәрім. Наименование данной установки является стенд [6] для фильтрационной очистки жидких пищевых продуктов от радионуклидов и солей тяжёлых металлов. Она представляет собой напорную систему с тремя вертикальными колоннами, соединёнными с насосом, трубопроводом и системой управляющими кранами [7].

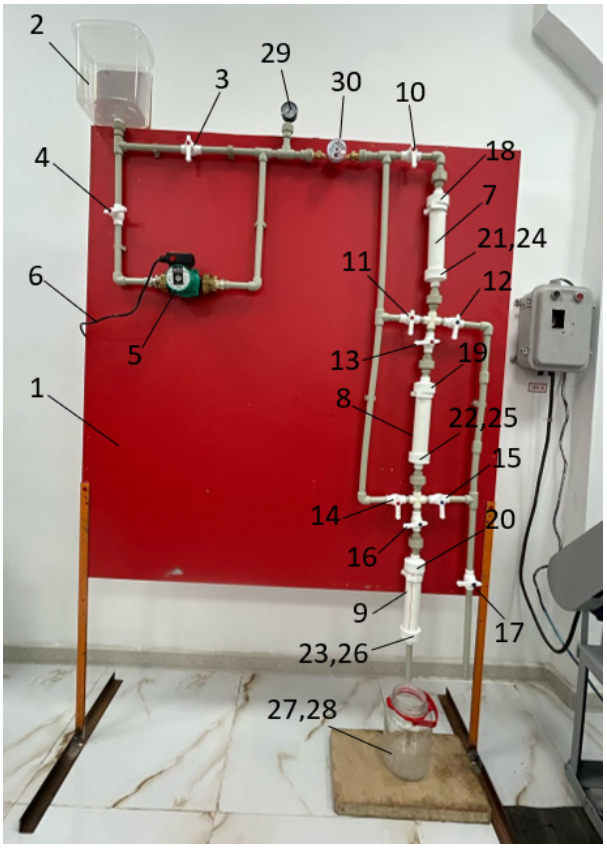


Рис.1 - Экспериментальная установка для адсорбционной очистки жидких пищевых продуктов от токсичных веществ [7]

1-опорная конструкция, 2-приёмная ёмкость, 3-кран для подачи жидкости самотёком, 4-кран для подачи жидкости с помощью насоса (под давлением), 5-центробежно-лопастной насос, 6-блок питания, 7, 8, 9-сорбционные колонны, 10-17-управляющие краны, 18-23-прокладки из технической резины, устойчивые к высоким/низким температурам, кислотам и щелочам, 24, 25, 26-сетки, предотвращающие вымывание сорбента, 27, 28-накопительные ёмкости, 29-манометр, 30-расходомер.

Преимуществом данной установки является возможность как индивидуального включения каждой колонны, так и их комбинированного соединения в различных последовательностях, что обеспечивает гибкость эксперимента и позволяет подбирать наиболее эффективные режимы адсорбции. В исследовании были опробованы разные виды природных сорбентов, что дало возможность определить наиболее подходящие ма-

териалы для снижения содержание токсичных веществ. В качестве сорбентов использовались: цеолит [8] Чанканайского месторождения (Кербулакский район, Алматинская область), шунгит [9] Коксуского месторождения и активированный уголь марки 207С, полученный из скорлупы кокосовых орехов [10]. На рисунке 2 представлены сорбенты, применённые в эксперименте. Каждая колонна загружалась определённым видом сорбента (фракция 2-1 мм), отобранным с учётом его селективности к радионуклидам и ионам тяжёлых металлов.



1 2 3

Рис.2 - Чанканайский цеолит № 1, коксуский шунгит № 2, активированный уголь из скорлупы кокосовых орехов № 3 [8-10]

Объекты исследования. В качестве объекта исследования была выбрана питьевая вода из водопроводной сети. Для оценки параметров работы экспериментального стенда использовали 5 литров воды при средней температуре 18-20 °С. В ходе эксперимента применялись природные сорбенты различного объёма - 50, 100, 150 и 200 мл (по шкале мерного стакана). Длительность процесса работы адсорбционно-фильтрационной установки составляла 3-5 минут.

Результаты и обсуждение. В первой колонне был загружен шунгит, во второй-цеолит, в третьей-кокосовый активированный уголь. Насос имел три уровня рабочей мощности: первая мощность-135 Вт, вторая мощность-200 Вт, третья мощность-245 Вт.

На графиках (рисунки 3-6) по оси X представлен объём сорбентов (50, 100, 150 и 200 мл по шкале мерного стакана), а по оси Y-время процесса (сек). Каждое исследование отражено отдельной диаграммой с указанием соответствующего режима фильтрации.

Экспериментальные данные показали (рисунок 3), что время фильтрации возрастает с увеличением объёма сорбентов. Наиболее эффективными оказались цеолит (2 колонна), кокосовый активированный уголь (3 колонна) объясняется их развитой пористой структурой и высокой удельной поверхностью, а также их совместное применение (1+2+3 колонны). Однако при объёме выше 150 мл наблюдалось резкое увеличение времени процесса, особенно при комбинированном использовании трёх сорбентов.

При увеличении мощности до 200 Вт общее время фильтрации (рисунок 4) сократилось по сравнению с режимом 135 Вт. Оптимальные результаты были достигнуты при использовании цеолита и кокосового активированного угля (2 и 3 колонны), а также при комбинированной загрузке (1+2+3 колонны). Рост времени при увеличении объёма был менее выраженным, что свидетельствует о более стабильном протекании процесса.

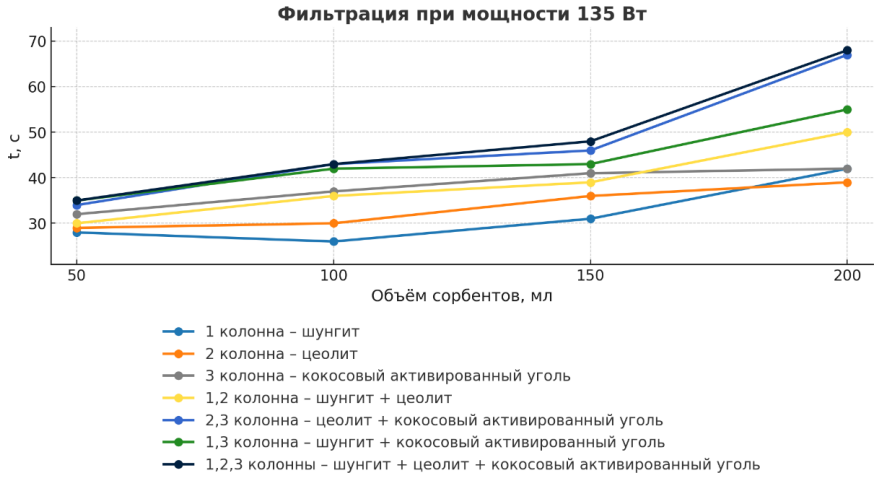


Рис.3 - Фильтрация воды при мощности насоса 135 Вт (первая скорость) с использованием различных сорбентов

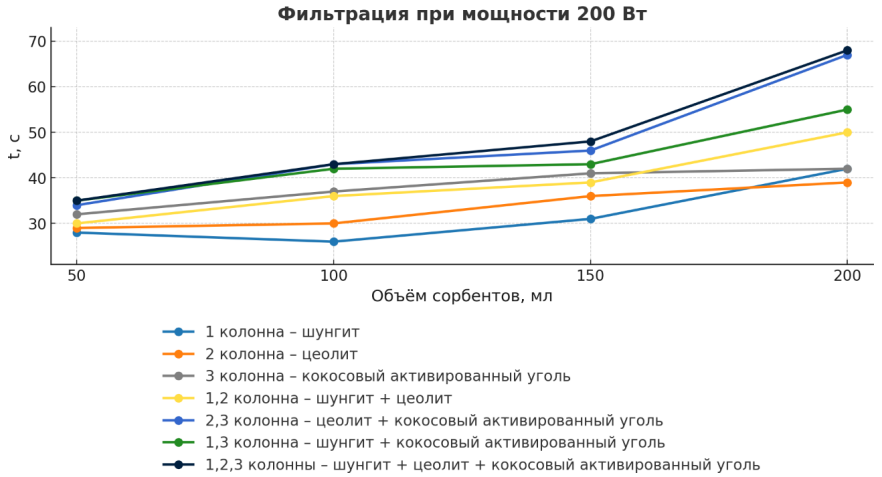


Рис.4 - Фильтрация воды при мощности насоса 200 Вт (вторая скорость) с использованием различных сорбентов

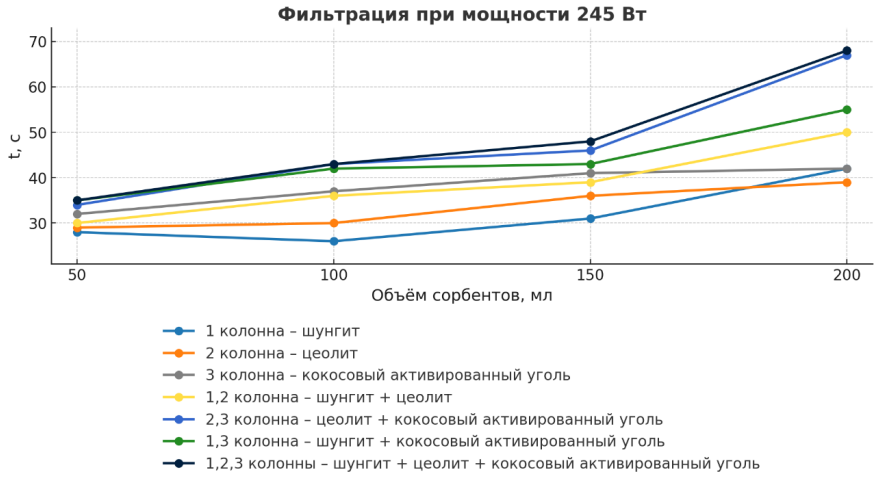


Рис.5 - Фильтрация воды при мощности насоса 245 Вт (третья скорость) с использованием различных сорбентов

В данном режиме процесс проходил намного быстрее: значения времени фильтрации (рисунок 5) оказались минимальными среди насосных режимов. Особенно эффективно проявил себя кокосовый активированный уголь (3 колонна) и его комбинация с цеолитом (2+3 колонны). Однако при больших объёмах сорбентов наблюдалась тенденция к перегрузке и росту времени процесса.

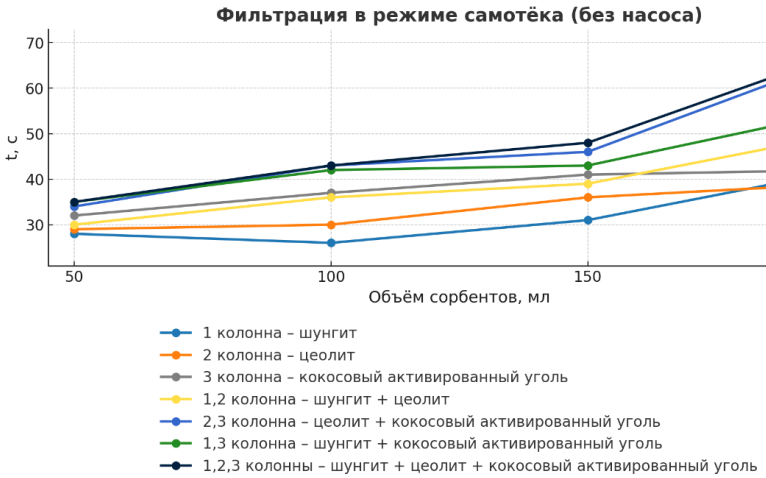


Рис.6 - Фильтрация воды в режиме самотёка (без насоса) с использованием различных сорбентов

Данный вариант на рисунке 6 показал наихудшие результаты: время фильтрации оказалось в десятки раз выше по сравнению с насосными режимами и достигало 300-370 с при объёме 200 мл. Наиболее выраженное замедление наблюдалось при комбинации шунгита и цеолита (1+2 колонны), а также при использовании всех трёх сорбентов одновременно (1+2+3 колонны). Таким образом, самотёчный режим можно признать неприемлемым для практического применения.

Выводы. Проведён анализ и определены, что:

- самотёчный режим неэффективен из-за чрезмерного увеличения времени фильтрации.

- при мощности 135 Вт (первая скорость) наблюдается рост времени при увеличении

объёма, что ограничивает применение режима;

- наиболее сбалансированные результаты получены при мощности *200 Вт (2*

скорость): процесс идёт значительно быстрее, чем при 135 Вт (первая скорость), но без резкого увеличения времени, как при 245 Вт (третья скорость);

- при 245 Вт (третья скорость) достигается минимальное время фильтрации, но при

больших объёмах сорбентов появляется перегрузка и резкий рост времени.

Следовательно, *оптимальным режимом фильтрации для установки является работа при мощности 200 Вт (2 скорость),* с применением цеолита, кокосового активированного угля (2+3 колонны) или их комбинации (1+2+3 колонны). Наиболее стабильные результаты получены при объёмах сорбентов *100-150 мл* по шкале мерного стакана, где обеспечивается минимальное время фильтрации при сохранении высокой эффективности очистки. При объёме 200 мл наблюдалась тенденция к перегрузке, что ограничивает практическое применение больших загрузок. Полученные результаты позволяют рекомендовать усовершенствованную установку для применения в системах предварительной очистки жидких пищевых продуктов от токсичных веществ.

Литература

1. Dolenko S.O., Trifonova M.Y., Ivanova Z.G. Influence of Natural Water Components on the Sorption of Dodecyl Sulfate Anions on Kaolinite//J. Water Chem. Technol.-2022.-Vol.44(1).-P.1-9. DOI 10.3103/S1063455X22010027.

2. Мантлер С.Н., Жуманазарова Г.М. Процессы и аппараты химической технологии: Учебное пособие.Алматы: «Бастау».-2018.-Р.256. ISBN 978-601-7275-76-1.

3. Chen Y. et al. Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process - A review//Advances in colloid and interface science. - 2011. -Vol.163(1).- P.39-52. DOI 10.1016/j.cis.2011.01.006.

4. Беляева Е.А. Адсорбционная очистка сточных вод//Синтез науки и образования в решении глобальных проблем современности: сборник статей Международной научно-практической конференции//Стерлитамак:АМИ.-2020.-С.57-58.-URL: https://ami.im/sbornik/MNPK-272.pdf.

5. Kakimov A., Jilkisheva A., Mayorov A., Zharykbasova K., Kakimova Z., Mirasheva G., Zharykbasov Y., Zolotov A.,Yessimbekov Z. Developing the process parameters of milk pasteurization for reducing the concentration of toxic elements and radionuclides//ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.-2019.Vol.14(13).-P.2443-2447.

6. Стенд для фильтрационной очистки жидких пищевых продуктов от радионуклидов и солей тяжёлых металлов. Патент РК №11024 G01N 15/00.

7. Базанова А.К., Какимов А.К., Лобасенко Б.А. и другие. Совершенствование установки для снижения содержания токсичных веществ в молоке// Вестник АТУ -2025.-Т.149(3).-С.19-26. DOI 10.48184/2304-568X-2025-3-19-26.

8. Yurak V., Apakashev R., Dushin A., Usmanov A., Lebzin M., Malyshev A. Testing of Natural Sorbents for the Assessment of Heavy Metal Ions' Adsorption.//Appl. Sci. -2021.-Vol 11(8):3723. DOI 10.3390/app11083723.

9. Мусина У.Ш. Экологический потенциал Коксуского шунгита//Гидрометеорология и экология.-2010.- № 4.- С.154-159.

10. Кокосовый активированный уголь (сорбция):-URL: https://sebekpro.ru/katalog-resheniy/gotovye-resheniya/172-kokosovyj-aktivirovannyj-ugol-sorbtsiya.html.- Дата обращения: 29.09.2025.

References

1. Dolenko S.O., Trifonova M.Y., Ivanova, Z.G. Influence of Natural Water Components on the Sorption of Dodecyl Sulfate Anions on Kaolinite//J. Water Chem. Technol.-2022.-Vol.44(1). -P.1-9. DOI 10.3103/S1063455X22010027.

2. Mantler S.N., Zhumanazarova G.M. Processy i apparaty himicheskoj tehnologii: Uchebnoe posobie. Almaty: «Bastau».-2018.-R.256. ISBN 978-601-7275-76-1. [in Russian]

3. Chen Y. et al. Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process - A review//Advances in colloid and interface science. - 2011. -Vol.163(1).-P.39-52. DOI 10.1016/j.cis.2011.01.006.

4. Beljaeva E.A. Adsorbcionnaja ochistka stochnyh vod//Sintez nauki i obrazovanija v reshenii global' nyh problem sovremennosti: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii// Sterlitamak: AMI.-2020.-S.57-58.-URL: https://ami.im/sbornik/MNPK-272.pdf. [in Russian]

5. Kakimov A., Jilkisheva A., Mayorov A., Zharykbasova K., Kakimova Z., Mirasheva G., Zharykbasov Y., Zolotov A.,Yessimbekov Z. Developing the process parameters of milk pasteurization for reducing the

concentration of toxic elements and radionuclides//ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.-2019.Vol.14(13).-P.2443-2447.

6. Stend dlja fil’ tracionnoj ochistki zhidkih pishhevyh produktov ot radionuklidov i solej tjazhjolyh metallov. Patent RK №11024 G01N 15/00. [in Russian]

7. Bazanova A.K., Kakimov A.K., Lobasenko B.A. i drugie. Sovershenstvovanie ustanovki dlja snizhenija soderzhanija toksichnyh veshhestv v moloke// Vestnik ATU -2025.-T.149(3).-S.19-26. DOI 10.48184/2304-568X-2025-3-19-26. [in Russian]

8. Yurak V., Apakashev R., Dushin A., Usmanov A., Lebzin M., Malyshev A. Testing of Natural Sorbents for the Assessment of Heavy Metal Ions’ Adsorption.//Appl. Sci. -2021.-Vol 11(8):3723. DOI 10.3390/app11083723.

9. Musina U.Sh. Jekologicheskij potencial Koksuskogo shungita//Gidrometeorologija i jekologija.- 2010.-№ 4.- S.154-159. [in Russian]

10. Kokosovyj aktivirovannyj ugol’ (sorbcija):- URL: https://sebekpro.ru/katalog-resheniy/gotovye-resheniya/172-kokosovyj-aktivirovannyj-ugol-sorbtsiya.html.- Data obrashhenija: 29.09.2025. [in Russian]

Сведения об авторах

Какимов А.К.-доктор технических наук, профессор, Шәкәрім университет, Семей, Казахстан, e-mail: bibi.53@mail.ru;

Ибрагимов Н.К.-кандидат технических наук, ассоциированный профессор, преподаватель, Шәкәрім университет, Семей, Казахстан, e-mail: ibragimnk@mail.ru;

Ташыбаева М.М.–PhD, преподаватель, Шәкәрім университет, Семей, Казахстан, e-mail: marzhan06081990@gmail.com;

Базанова А.К.-докторант, Шәкәрім университет, Семей, Казахстан, e-mail: arayka.bazanovak@mail.ru.

Information about authors

Kakimov A.K.-Doctor of Technical Sciences, Professor, Shakarim University, Semey, Kazakhstan, e-mail: bibi.53@mail.ru;

Ibragimov N.K.-Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lecturer, Shakarim University, Semey, Kazakhstan, e-mail: ibragimnk@mail.ru;

Tashybayeva M.M.-PhD, Lecturer, Shakarim University, Semey, Kazakhstan, e-mail: marzhan06081990@gmail.com;

Bazanova A.K.- doctoral student, Shakarim University, Semey, Kazakhstan, e-mail: arayka.bazanovak@mail.ru.

ҒТАМР 65.59.31 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1314**

ПІСІРІЛГЕН ШҰЖЫҚ ӨНДІРІСІНДЕ АҚУЫЗ-МАЙ ЭМУЛЬСИЯСЫНЫҢ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖАСАУ

[1]Ш.Б. Байтукенова, [1]М. Бақытбек, [2]С.Б. Байтукенова, [1]А.Т. Костанова

[1]«С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан,
[2]«Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана, Қазақстан

Корреспондент-автор: baytukenova75@mail.ru

Бұл мақалада ақуыз-май эмульсиясының технологиясын жасау және оны пісірілген шұжық өнімдерінде қолдану тиімділігі зерттелді. Зерттеудің негізгі мақсаты – ақуыз-май эмульсияның функционалдық, құрылымдық және органолептикалық қасиеттеріне әсерін анықтау және тағамдық өнімдердің сапасын арттыруға бағытталған технологиялық шешімдерді жасау болып табылады.

Зерттеу барысында бірнеше тәжірибелік үлгілер дайындалып, олардың құрылымдық-механикалық және органолептикалық көрсеткіштері және энергетикалық құндылығы қарастырылды. Алынған нәтижелер компоненттердің үйлесімділігі эмульсияның тұрақтылығы мен біркелкі құрылымына, сондай-ақ дайын өнімнің дәмдік қасиеттерінің жақсаруына тікелей әсер ететінін көрсетті. Сонымен қатар, ақуыз-май эмульсиясының құрамындағы әр компоненттің өзара қатынасы өнімнің технологиялық өңдеуге төзімділігін қамтамасыз етіп, тағамдық құндылығын сақтауға мүмкіндік береді.

Пісірілген шұжық рецептурасы құрамына ақуыз-май эмульсиясын 15% енгізу олардың құрылымын және дәмдік қасиетін жақсартады, сондай-ақ текстурасын жұмсартатыны анықталды. Эмульсия өнімнің ылғал ұстағыш қасиетін арттырып, 4 °С температурада сақтаған кезде бақылау үлгісімен салыстырғанда 5-7 күнге ұзарды, бұл әсіресе дайын өнімнің сапасын сақтау үшін маңызды. Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде пісірілген шұжық рецептурасы құрамына ақуыз-май эмульсиясын 15% енгізу дайын өнімнің құрылымдық, функционалдық және органолептикалық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік беріп қана қоймай, өндірістік тиімділікті арттырады және заманауи тұтынушылардың тағам өнімдеріне қойылатын талаптарына толық сәйкес келеді.

Түйін сөздер: соя сүті, зәйтүн майы, соя изоляты, ақуыз-май эмульсиясы, физика-химиялық қасиеттері, құрылымдық-механикалық қасиеттері, пісірілген шұжық өнімдері, технологиялық сұлба.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ БЕЛКОВО-ЖИРОВОЙ ЭМУЛЬСИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВАРЕНОЙ КОЛБАСЫ

[1]Ш.Б. Байтукенова, [1]М. Бақытбек, [2]С.Б. Байтукенова, [1]А.Т. Костанова

[1]НАО «Казахский агротехнический, исследовательский университет им. С.Сейфуллина», Астана, Казахстан,
[2]АО «Казахский университет технологии и бизнеса, им. К. Кулажанова» Астана, Казахстан,
e-mail: baytukenova75@mail.ru

В данной статье изучена эффективность разработки технологии белково-жировой эмульсии (БЖЭ) и ее применения в производстве вареной колбасы. Основной целью исследования является выявление влияния белково-жировой эмульсии на функциональные, структурные и органолептические свойства и разработка технологических решений, направленных на повышение качества пищевых продуктов.

В ходе исследования было подготовлено несколько опытных образцов БЖЭ, рассмотрены их структурно-механические и органолептические показатели и энергетическая ценность. Полученные результаты показали, что совместимость компонентов напрямую влияет на стабильность и однородную структуру эмульсии, а также на улучшение вкусовых свойств готового продукта. Кроме

того, соотношение каждого компонента в составе белково-жировой эмульсии позволяет сохранить пищевую ценность, обеспечивая устойчивость продукта к технологической обработке.

Установлено, что введение 15% белково-жировой эмульсии в рецептуру вареной колбасы улучшает их структуру и вкусовые качества, а также смягчает текстуру. Эмульсия увеличивает влагоудерживающие свойства продукта и позволяет продлить срок хранения на 5-7 дней по сравнению с контрольным образцом при температуре 4 °C, что особенно важно для поддержания качества готового продукта. В результате проведенных исследований введение 15% белково-жировой эмульсии в рецептуру вареной колбасы не только позволило улучшить структурные, функциональные и органолептические свойства готового продукта, но и повысило эффективность производства и полностью соответствовало требованиям современных потребителей к пищевой продукции

Ключевые слова: соевое молоко, оливковое масло, соевый изолят, белково-жировая эмульсия, физико-химические свойства, структурно-механические свойства, вареные колбасные изделия, технологическая схема.

DEVELOPMENT OF PROTEIN-FAT EMULSION TECHNOLOGY IN THE PRODUCTION OF BOILED SAUSAGE

[1]Sh.B. Baitukenova✉, [1]M. Bakytbek, [2]S.B. Baitukenova, [1]A.T. Kostanova

[1]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research, University, Astana, Kazakhstan,
[2]«K. Kulazhanov Kazakh University of Technology, and Business, Astana, Kazakhstan,
e-mail: baytukenova75@mail.ru

This article examines the effectiveness of the development of protein-fat emulsion (BGE) technology and its application in the production of boiled sausage. The main purpose of the study is to identify the effect of protein-fat emulsion on functional, structural and organoleptic properties and to develop technological solutions aimed at improving food quality.

In the course of the study, several prototypes of BZHE were prepared, their structural, mechanical and organoleptic characteristics and energy value were considered. The results showed that the compatibility of the components directly affects the stability and homogeneous structure of the emulsion, as well as the improvement of the taste properties of the finished product. In addition, the ratio of each component in the protein-fat emulsion makes it possible to preserve the nutritional value, ensuring the product' s resistance to technological processing.

It was found that the introduction of 15% protein-fat emulsion into the recipe of boiled sausage improves their structure and taste, as well as softens the texture. The emulsion increases the moisture-retaining properties of the product and allows you to extend the shelf life by 5-7 days compared to the control sample at a temperature of 4 °C, which is especially important for maintaining the quality of the finished product. As a result of the research, the introduction of 15% protein-fat emulsion into the recipe of boiled sausage not only improved the structural, functional and organoleptic properties of the finished product, but also increased production efficiency and fully met the requirements of modern consumers for food products.

Keywords: soy milk, olive oil, soy isolate, protein-fat emulsion, physico-chemical properties, structural and mechanical properties, boiled sausages, technological scheme.

Кіріспе. Соңғы жылдары Қазақстанның тамақ өнеркәсібінде өсімдік текті ингредиенттерді қолдану қарқынды дамып келеді. Тұтынушылардың табиғи, қауіпсіз және құрамы жағынан теңгерімді өнімдерге деген сұранысы артқан сайын, өңделген өсімдік шикізатына негізделген технологиялардың маңызы барған сайын артып отыр. Әсіресе соя дәнінен алынатын ақуыздар мен майлар тағам өндірісінде кеңінен қолданылатын функционалды компонент ретінде ерекше

қызығушылық тудыруда.

Қазақстан Республикасы Стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігінің 2025 жылғы мәліметтері бойынша, елде майлы дақылдар өндірісі соңғы бес жылда 35-40%-ға артқан, оның ішінде соя дақылының үлесі тұрақты өсім көрсетуде.2025 жылы Республикада 190 мың тоннадан астам соя жиналып, бұл оған өңдеу саласында жаңа технологияларды енгізуге жағдай жасады. Сонымен қатар, соңғы үш жылда өсімдік негізіндегі өнімдерге сұраныс 25%-ға артқаны байқалады, бұл халықтың дұрыс тамақтану мәдениетінің қалыптасуына және функционалды өнімдерге бет бұруына тікелей байланысты [1].

Соя дәнінің құрамындағы 40%-ға дейінгі ақуыз, 18-20% май, маңызды аминқышқылдары, фосфолипидтер және биологиялық белсенді қосылыстар сояны тағамдық эмульсиялар алу үшін тиімді шикізатқа айналдырады. Соя ақуызының табиғи эмульгирлеуші қабілеті, май фазасын тұрақтандыру қасиеті және гидратациялық мүмкіндігі ақуыз – май қоспаларын дайындауда үлкен артықшылық береді. Мұндай эмульсиялар құрылым түзуші, тұтқырлық қалыптастырушы, майды біркелкі таратуға көмектесетін технологиялық компонент ретінде жоғары бағаланады [2].

Соңғы зерттеулер соя ақуызы негізіндегі эмульсиялардың тағам құрылымының тұрақтылығын арттырып, ылғал және май ұстағыштық мүмкіндігін күшейтіп, өнімнің органолептикалық қасиеттерін жақсартатынын көрсетіп отыр. Эмульсия құрамындағы ақуыз-май қатынасының дұрыс таңдалуы дайын өнімнің консистенциясына, тұтқырлығына, энергетикалық құндылығына және сақтау тұрақтылығына тікелей әсер етеді [3].

Қазақстанда өсімдік ингредиенттері өндірісінің артуы - соя негізіндегі ақуыз-май эмульсияларын кеңінен енгізу үшін қолайлы жағдай қалыптастырады. Бұл технологияны қолдану: өнімнің құрылымдық және технологиялық қасиеттерін жақсартады; табиғи эмульгирлеуші компоненттер есебінен қоспалардың мөлшерін азайтады; функционалды құндылығын арттырады; өндіріске жұмсалатын шығынды төмендетеді; отандық кәсіпорындардың бәсекеге қабілеттілігін күшейтеді.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу объектісі: ақуыз-май қоспасы, соя сүті, соя ақуызының изоляты, өсімдік майы - зәйтүн майы.

Шикізаттың сапалық көрсеткіштері: соя сүті - Қазақстандағы «АгроСоя» ЖШС өндірген, 3-4 % ақуыз үлесімен, ГОСТ 32252-2013 стандартына сәйкес; соя ақуызының изоляты – Шаньсун-90 маркасы (Shansong 90), 90% ақуыз үлесімен; зәйтүн майы - Италиядан импортталған «Bertolli Original» бірінші суық сығымдалған, экстракласс, қаныққан май қышқылдары 14-15%, моноқанықпаған 70-78%. Физика-химиялық сипаттамалары: соя сүті – pH 6,5-7,0, ылғал 90%; соя изоляты - гидратация қабілеті 1:5; зәйтүн майының тотығу индексі <0,5 мэкв/кг ((миллививаленттерінде).

Зерттеулер С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің етті қайта өңдеу эксперименттік-өндірістік цехта және зертхана жағдайында жүргізілді. Өнімдегі ылғалдың, ақуыздың, майдың, минералды заттардың массалық үлесі стандартты әдістер бойынша анықталды. Органолептикалық көрсеткіштерін анықтауда сынамалар 5 балдық жүйе бойынша сыртқы түрі, иісі, дәмі, консистенциясы және түсі бойынша бағаланды. Органолептикалық бағалау ГОСТ 9959-2015 сәйкес жүргізілді.

Су байланыстырғыш және май сіңіру қабілеттілігі (СБҚ және МСҚ), pH көрсеткіштері мен шығымы анықталды (нақты нәтижелер төмендегі кестеде). Микробиологиялық көрсеткіштер ГОСТ 54354-2011 сәйкес зерттелді: жалпы бактерия саны <103 КОЕ/г, колиформалар жоқ, сақтау мерзімі 4°С-та 14-21 күн (бақылау үлгісі 7-14 күн). Зерттеу нәтижелері дисперсиялық талдау (ANOVA) әдісімен статистикалық өңдеуден өткізілді.

Нәтижелер мен талқылау. Ақуыз-май эмульсиясының өндірістік және функционалды қасиеттерін зерттеу қазіргі тағам өнеркәсібінде маңызды мәселе болып табылады. Бұл қоспа-

ның негізгі мақсаты ақуыз бен майдың біркелкі таралуын қамтамасыз ету, тұрақты құрылымға ие эмульсия алу, ылғал мен майды ұстап тұру қабілетін жақсарту, сондай ақ тағамдық қасиеттерін сақтау [4].

Қоспаның сапасы бірнеше факторға байланысты: шикізат құрамындағы ақуыз бен майдың қатынасы, эмульсияның құрылымдық тұрақтылығы, су байланыстырғыш қабілеті және органолептикалық сипаттар (түс, консистенция, дәм, және иіс). Осы факторлардың оңтайлы үйлесімі ақуыз-май эмульсиясының технологиялық және тағамдық қасиеттерін максималды түрде арттыруға мүмкіндік береді [5].

Ақуыз-май қоспасын алу үшін бірнеше өсімдік шикізаттары қарастырылды соя, жасымық, ноқат және ұрмебұршақ. Әрқайсының өзіндік ерекшеліктері бар және олардың химиялық құрамы мен функционалды қасиеттері қоспаның сапасына тікелей әсер етеді. Соя ең жоғарғы ақуыз мөлшерімен ерекшеленеді, сонымен қатар эмульсия түзу қабілеті жоғары, бұл оны ақуыз-май эмульсиясының негізгі компоненті ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Жасымық пен ноқат құрамында ақуыз жеткілікті және олар қоспаның органолептикалық қасиеттерін жақсартуға, дәмін байытуға, құрылымын жұмсартып, консистенциясы біркелкі етуге ықпал етеді. Ұрмебұршақ қосылған қоспалар фарштың ылғал ұстай алу қабілетін арттырып, құрылымдық тұрақтылығын нығайтады [6].

Соя, жасымық, ноқат және үрмебұршақ – тағам өнеркәсібінде маңызды орын алатын өсімдік текті шикізаттар, олар ақуызға, көмірсуға, биологиялық белсенді қосылыстарға бай болуымен, сондай-ақ функционалдық-технологиялық қасиеттерімен ерекшеленеді. Бұл дақылдар ақуыз-май қоспасын байыту, құрылымын жақсартуға мүмкіндік береді [7].1-ші кестеде өсімдік шикізаттарының химиялық құрамы көрсетілген.

1-кесте. Өсімдік шикізаттарының химиялық құрамы

Көрсеткіштер	Соя	Жасымық	Ноқат	Ұрмебұршақ
Ақуыздың массалық үлесі, %	40	26	19	21
Майдың массалық үлесі, %	18	1	6	2
Көмірсулардың массалық үлесі, %	30	48	50	55
Минералды заттардың массалық үлесі, %	4.5	3	2.6	3
Фосфолипидтердің массалық үлесі, %	12	10	10	10

2-кесте. Өсімдік май шикізаттарының физика-химиялық құрамы

Көрсеткіштері	Зәйтүн	Күнбағыс	Зығыр
Қаныққан май қышқылдары, %	14-15	10-11	9-10
Витамин Е, мг/100	14-20	40-50	20-30
Моноқанықпаған май қышқылдары, %	70-78	19-25	18-22
Полиқанықпаған май қышқылдары, %	12-34	65-70	65-72
Омега-6 (линол қышқылы), %	11-12	60–65	15-18
Омега-3 (α-линолен қышқылы), %	0.5-1	1	50–60
Полифенолдар, мг/кг	150-300	20–50	50–80
Стеролдар мг/100	100-150	100-120	60-80

Сояның басты артықшылығы жоғары ақуыз мөлшері мен функционалды қасиеттері, бұл эмульсияның құрылымын тұрақтандырады, май мен судың біркелкі бөлінуін қамтамассыз етеді және өнімнің органолептикалық көрсеткіштерін жақсартады. Сонымен қатар, соя ақуызы биологиялық құндылығы жоғары, құрамындағы аминқышқылдар және май қышқылдары эмульсияның тағамдық қасиеттерін арттыруға септігін тигізеді. Сондықтан ақуыз-май қоспасын алу үшін негізгі шикізат ретінде соя таңдалды [8, 9].

Ақуыз-май эмульсиясының функционалды қасиеттерін арттыру және өнімнің құрылымдық тұрақтылығын қамтамассыз ету үшін әртүрлі өсімдік майларыда пайдаланылады. Зәйтүн, күнбағыс және зығыр майларының негізгі химиялық құрамы 2-ші кестеде көрсетілген.

Зәйтүн, күнбағыс және зығыр майлары тағам өнеркәсібінде кеңінен қолданылатын өсімдік майлары болып табылады және олардың технологиялық тиімділігі тікелей химиялық құрамына байланысты анықталады. Бұл майлардың негізгі компоненті – триглицеридтер, бірақ май қышқылдарының арақатынасы әрқайсысында айтарлықтай өзгеше, сондықтан олардың құрылымдық және функционалдық қасиеттерінде айырмашылық туындайды. Зәйтүн майы негізінен моноқанықпаған май қышқылдарына, әсіресе олеин қышқылына бай (70-78%). Бұл оның тотығуға төзімділігін арттырып, технологиялық өңдеу кезінде тұрақтылық береді. Олеин қышқылдарының жоғары мөлшері эмульсиялардың беріктігін жақсартады, май глобулаларының дисперсиясын теңестіреді және өнімнің текстуралық қасиеттерін жұмсарта түседі. Сонымен қатар, құрамындағы табиғи полифенолдар мен Е дәрумені антиоксидант қасиет көрсетіп, майдың бұзылу жылдамдығын төмендетеді [10, 11].

Күнбағыс майында керісінше полиқанықпаған май қышқылдары басым, әсіресе линол қышқылы 60-70% мөлшерде кездеседі. Бұл оның биологиялық құндылығын арттырғанымен, тотығуға табиғи төзімділігін төмендетеді. Дегенмен, құрамындағы токоферолдар мөлшері зәйтүн майына қарағанда жоғары, бұл белгілі бір деңгейде тұрақтылықты сақтайды. полиқанықпаған май мөлшерінің көп болуы эмульсия құрылымын әлсіретуі мүмкін, сондықтан өнім құрамындағы ақуыз немесе фосфолипидтер сияқты табиғи эмульгаторлармен бірге қолдану май бөлінуінің алдын алады және шұжық өндірісінде майдың біркелкі таралуын қамтамасыз етеді [12].

Зығыр майы май қышқылдық құрамы бойынша ең ерекше өнімдердің бірі болып саналады, себебі оның жалпы майының 50-55%-ын α-линолен (омега-3) қышқылы құрайды. Бұл майды функционалдық тағамдарда өте құнды етеді, алайда омега-3 қышқылдарының тотығуға өте сезімтал болуына байланысты оның тұрақтылығы төмен, сақтау мерзімі қысқа және термиялық өңдеу кезінде оңай бұзылады [13]. Зығыр майы нәзік эмульсия құра алады, бірақ тұрақты болуы үшін қосымша антиоксиданттар немесе тұрақтандырғыштар қажет.

Сондықтан оны термиялық өңделетін өнімдерге шектеулі мөлшерде ғана енгізу ұсынылады [14]. Осылайша, үш майдың да құрылымдық қасиеттеріндегі айырмашылық тікелей олардың май қышқылдық құрамына байланысты: зәйтүн майы - жоғары моноқанықпаған майлардың арқасында тұрақты және технологиялық тұрғыда қолайлы; күнбағыс майы – линол қышқылының жоғары мөлшерінің әсерінен тұрақтылығы төмендеу, бірақ биологиялық құндылығы жоғары; ал зығыр майы – омега-3 қышқылының ең бай көзі ретінде бағалы, бірақ өте тез тотығып, термиялық өңдеуге төзімсіз. Сондықтан бұл майларды тағам өндірісінде қолданғанда олардың химиялық құрамына сәйкес технологиялық режимдер таңдалады, ал ақуыз-май жүйелеріне дұрыс үйлестіру өнім сапасын арттыруға мүмкіндік береді [15, 16].

Ақуыз-май эмульсиясының әртүрлі үлгілерінің функционалды, технологиялық және органолептикалық қасиеттері ескеріле отырып, оның оңтайлы мөлшері соя сүті 50%, зәйтүн майы 44%, соя ақуыз изоляты - 5% анықталды (кесте 3). Бұл көрсеткіш эмульсияның тұрақтылығын сақтауға, құрылымын біркелкілеуге және тағамдық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді.

3-кесте. Ақуыз-май эмульсиясының бақылау үлгісінің рецептурасы

Шикізат, кг/100 кг	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Соя сүті, ақуыз 3-4%	44	47	50	54	60
Зәйтүн майы	50	47	44	40	34
Соя ақуыз изоляты	5	5	5	5	5
Лимон шырыны	1	1	1	1	1
Барлығы:	100	100	100	100	100

Ақуыз-май эмульсиясының сапалық көрсеткіштерін жан-жақты бағалау үшін әртүрлі арақатынаста дайындалған бес бақылау үлгісі зерттелді. Әр үлгіде компоненттердің мөлшері өзгертіліп, олардың физика-химиялық құрамы, ақуыз және май мөлшері және көмірсу мөлшері эмульсия тұрақтылығы мен құрылымдық-технологиялық қасиеттері анықталды. Бұл талдау әр үлгінің өзара әрекеттесу ерекшеліктерін бағалап, ақуыз-май эмульсиясының қандай мөлшерде ең үйлесімді қалыптасатынын көрсетеді.

Соя ақуызының суды байланыстыру қабілеті, май бөлшектерін тұрақтандыруы және эмульсия дисперстілігіне әсері, сондай-ақ зәйтүн майының май фазасын біркелкі таратуы мен қоспаның нәзіктілігіне ықпалы әр үлгінің физика-химиялық нәтижелеріне тікелей әсер етті (кесте 4). Бес түрлі үлгіні салыстыра отырып, ақуыз-май эмульсиясының құрылымы, тұрақтылығы және функционалдық қасиеттері бойынша оңтайлы құрамды таңдауға мүмкіндік туды. Бұл қоспаны әрі қарай технологиялық процестерге енгізу үшін негіз болып табылады.

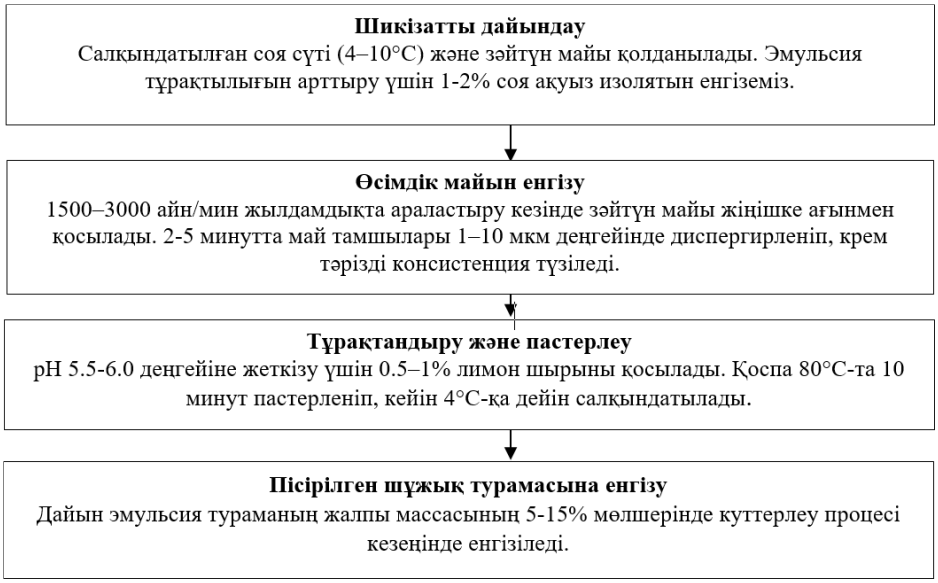
4-кесте. Ақуыз-май эмульсиясының физика-химиялық құрамы

Көрсеткіштер	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Ақуыздың массалық үлесі, %	20	22	24	26	28
Майдың массалық үлесі, %	25,5	24,75	24	23,25	22,5
Көмірсудың массалық үлесі, %	15	16,5	18	19,5	21
Энергетикалық құндылығы: • Ккал	662,75	639,93	617,10	594,28	571,45
• кДж	2777,27	2678.73	2583,18	2487,64	2392,09

Зерттеу барысында ақуыз-май эмульсиясының бес түрлі үлгісі салыстырылып, олардың тағамдық құрамы мен энергиялық құндылығы анықталды. Әр нұсқада ақуыз, май және көмірсу мөлшері мақсатты түрде өзгертіліп, композицияның оптималды пропорциясын табу көзделді. Алынған мәліметтер бойынша үлгілер арасындағы айырмашылықтар айқын байқалды: ақуыз үлесі 20-28 % аралығында, май мөлшері 22,5-25,5 %, ал көмірсулар 15-21 % аралығында өзгерді. Осы өзгерістер қоспаның энергетикалық құндылығына да әсер етті ккал көрсеткіші 571,45-662,75 аралығында болды.

Берілген мәліметтерді талдай отырып, үшінші үлгінің құрамы теңгерімді екені байқалды. Бұл үлгіде ақуыз (24 %) және май (24 %) мөлшерінің тең болуы эмульсияның тұрақтылығына, құрылымдық біркелкілікке және технологиялық жағынан қолайлы консистенцияға ықпал етуі мүмкін. Сонымен қатар көмірсу мөлшерінің

18 % деңгейінде болуы жалпы жүйенің энергия балансын сақтауына әсер етеді. Осы көрсеткіштер үшінші үлгіні ақуыз-май эмульсиясының оңтайлы нұсқасы ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.



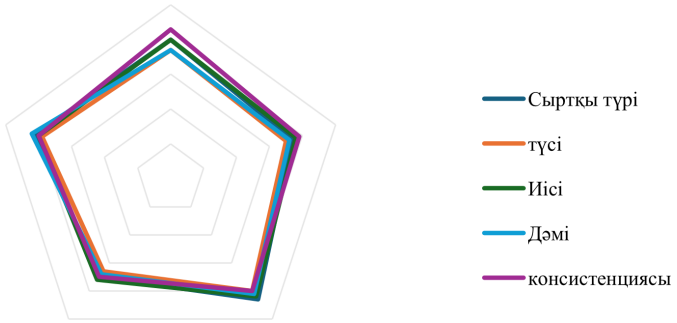
1 - сурет. Ақуыз-май эмульсиясының технологиялық сұлбасы

Жүргізілген зерттеулер негізінде соя дәнінен ақуыз-май эмульсиясын алу технологиясы жасалды (1 сурет). Технологияның артықшылықтары, соя сүті және соя ақуыз изоляты эмульсияның тұрақтылығын қамтамасыз етеді, зәйтүн майымен араластыру нәтижесінде тұрақты, бірқелкі құрылымды қоспа алуға мүмкіндік береді. Бұл процесс, өндірістік жабдықтарды қолданумен жүргізілетіндіктен, өндірістің қауіпсіздігі мен өнімнің сапасы артады.

Сонымен қатар, алынған эмульсия тағамдық өнімдерге (мысалы, шұжық және ақуыз-май қоспалары) қосылғанда олардың құрылымы тұрақты, дәмі толық, текстурасы жұмсақ болып, сақтау мерзімі ұзартылады, шығындарды азайтуға мүмкіндік береді [17]. Ақуыз-май эмульсиясының функционалдық көрсеткіштері 5-ші кестеде және 2 суретте ақуыз-май эмульсиясы үлгілерінің салыстырмалы органолептикалық көрсеткіштерінің диаграммасы көрсетілген.

5-кесте. Ақуыз-май эмульсиясының функционалдық көрсеткіштері

Көрсеткіштер	**Бақылау үлгісі**	**№3 үлгі (оңтайлы)**
Су байланыстырғыш қабілеті (СБҚ), %	65 ± 2,1	78 ± 1,8
Май сіңіру қабілеті (МСҚ), %	55 ± 1,5	72 ± 1,2
pH	5,4 ± 0,1	5,6 ± 0,05
Шығым, %	92 ± 1,0	96 ± 0,8
Жалпы бактерия, КОЕ/г	$5x10^2$	$2x10^2$
Сақтау мерзімі, 4 °C температурда, күн	10 ± 2	17 ± 1,5



2 - сурет. Ақуыз-май эмульсиясы үлгілерінің салыстырмалы органолептикалық көрсеткіштерінің диаграммасы

2-ші суретте көрсетілген диаграммада бес түрлі ақуыз-май эмульсиясының органолептикалық көрсеткіштері салыстырылып берілді. Бағалау нәтижелері бойынша №3-ші үлгі сыртқы түрі, түсі, иісі, дәмі және консистенциясы жағынан жоғары балл жинап, басқа үлгілермен салыстырғанда неғұрлым жақсы сенсорлық көрсеткіш көрсетті. Бұл оның ақуыз бен майдың біркелкі эмульгирленуі тиімді жүргенін, құрылымының тұрақты қалыптасқанын және дәмдік қасиеттерінің үйлесімді екенін дәлелдейді.

Ақуыз бен майдың таралуы оңтайлы болуы өнім консистенциясының біртекті әрі тұрақты қалыптасуына әсер ететін негізгі факторлардың бірі болып табылады. Осы тұрғыдан алғанда, №3-ші үлгінің құрылымдық тұрақтылығы мен органолептикалық қабылдануы басқа үлгілерге қарағанда айқын басымдыққа ие болды.

Алынған нәтижелерді салыстырмалы бағалау үлгілер арасындағы айырмашылықтардың бар екенін көрсетті. №3-ші үлгінің pH мәні басқа үлгілермен салыстырғанда тұрақты және оңтайлы диапазонда орналасқаны анықталды. Бұл оның ақуыздық құрылымының жақсы гидратацияланғанын, май фазасының біркелкі бөлініп, қоспаның эмульсиялық тұрақтылығы жоғары болғанын көрсетеді.

Қорытынды. Зерттеу нәтижесінде соя сүті мен зәйтүн майынан алынған ақуыз-май эмульсиясының оңтайлы құрамы және оны алудың тиімді технологиясы анықталды. Бес

нұсқаның салыстырмалы талдауы көрсеткендей, ақуыз, май және көмірсулардың теңестірілген мөлшері ең жоғары құрылымдық-механикалық қасиеттерге ие болды және органолептикалық көрсеткіштерді қамтамасыз етті. Бұл технология өндірісті жеңілдетіп, өнімнің біркелкілігі мен қауіпсіздігін арттырады. Алынған ақуыз-май эмульсияны шұжық өндірісінде қолдану тағамның құрылымын, дәмін жақсартады және сақтау мерзімін ұзартады. Сонымен қатар, технология шикізатты тиімді пайдалану арқылы шығынды азайтуға мүмкіндік береді. Жұмыстың зерттеу нәтижелері ақуыз-май эмульсиясын тағам өндірісіне енгізудің ғылыми-технологиялық негізін қалады және оның функционалдық қасиеттерінің жоғарылығын дәлелдейді.

Әдебиеттер

1. Қазақстан Республикасы Стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігі. Ұлттық статистика бюросы.2025 жылғы 1 қазанға Қазақстан Республикасындағы қолда бар дәнді және бұршақ дақылдары. https://stat.gov.kz Қаралған күні: 07.09.2025.

2. Chen S., Tang C-H. Effect of varying β-conglycinin / glycinin ratios on the emulsifying and interfacial properties of soybean proteins.//Modern Food Science and Technology.-2016.-Vol.32(9).- P.62-68. DOI 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.9.010.

3. Conghui Liu, Xin Wang The physicochemical properties and stability of flaxseed oil emulsions: effects of emulsification methods and the ratio of soybean protein isolate to soy lecithin//Journal of the Science of Food and Agriculture - 2021. -Vol.101(15).-P.6407-6416. DOI 10.1002/jsfa.11311.

4. Shao Jiaqi,Yang Jing,Wu Ping, Jin, Weiping, Xiao Junxia. Effect of soy protein isolates obtained by weak-base synchronized membrane separation on nanoemulsion stability: A comparison with alkaline extraction/isoelectric precipitation and salt extraction//Food ChemistryArticle.- 2025.-Vol.495: 146471. DOI 10.1016/j.foodchem.2025.146471.

5. Bishunu Karki, Buddhi P. Lamsal, David Grewei, Anthony L. Functional properties of soy protein isolates produced from ultrasonicated defatted soy flakes//Journal of the American Oil Chemists' Society-2009.-Vol.86(10).-P.1021-1028. DOI 10.1007/s11746-009-1433-0.

6. Wenjie Xia,Wing Kie Siu, Leonar M.C. Linear and non-linear rheology of heat-set soy protein gels:Effects of selective proteolysis of β-conglycinin and glycinin// Food Hydrocollioids.-2021.-Vol.120(6):106962. DOI 10.1016/j.foodhyd.2021.106962.

7. Joyce Boye, Fatemeh Zare, Alison Pletch. Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed//Food Research international.-2010.-Vol.43(2).-P.414-431. DOI 10.1016/j.foodres.2009.09.003.

8. Dilek Dulgar Altiner, Şeyma Hallaç. The effect of soy flour and carob flour addition on the physicochemical, quality,and sensory properties of pasta formulations// International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences.-2020.-Vol.4(4).-P.406-417. DOI 10.31015/jaefs.2020.4.3.

9. Peanut and Soy Protein-Based Emulsion Gels Loaded with Curcumin as a New Fat Substitute in Sausages: A Comparative Study.//Gels.- 2025.- Vol. 11(1): 62 DOI 10.3390/gels11010062.

10. Tong Liu, Xinyu Zhen,Nan Zheng,Yaomei Ma, Yu Zhang, Hongyu Lei, Jiaxin Liu, Ruining Zhang, Jun Zhao. Functional properties and application potential of black soybean meal insoluble

dietary fiber remodeled by ultrasound combined with ultrahigh pressure.//LWT. -2025.- Vol. 221: 117594. DOI 10.1016/j.lwt.2025.117594.

11. Ioana Stanciu Technological Process of Obtaining Sunflower Oil.//Current Approaches in Engineering Research and Technology.-Vol.9.- P.88-111. DOI 10.9734/bpi/caert/v9/2616.

12. Ji Yao Zhang, Ellen Kim, Peter Lawrence, High Oleic Sunflower Oil Alters the Proportions of n-6 and n-3 Polyunsaturated Fatty Acids in Young and Aging C57BL/6 Heart Tissue//The FASEB Journal.-2015.-Vol.29(S1). DOI 10.1096/fasebj.29.1_supplement.598.11.

13. Ankit Goyal, Vivek Sharma, Neelam Upadhayay, Sandeep Gill, Manvesh Sihag. Flaxseed and flaxseed oil: An ancient medicine & modern functional food//J Food Sci Technol.- 2014.-Vol.51(9).-P.1633-1653. DOI 10.1007/s13197-013-1247-9.

14. Selina Khan, SharminAkter Lisa, MoniraObaid Tocopherol content of vegetable oils/ fats and their oxidative deterioration during storage. //World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences.-2015.-.-Vol.4(4).-P.1537-1548.

15. Ting Lu,Yan Shen, Zi-Xuan Wu, Hong-Kai, Ao Li,Yong-Fu Wang. Improving the oxidative stability of flaxseed oil with composite antioxidants comprising gallic acid alkyl ester with appropriate chain length//LWT.- 2021.-Vol.138(10):110763. DOI 10.1016/j.lwt.2020.110763.

16. Oleg Shadyro,Anna Sosnovskaya,Irina Edimecheva. Effect of biologically active substances on oxidative stability of flaxseed oil//J Food Sci Technol.- 2020. -Vol.57(1).-P.243–252. DOI 10.1007/s13197-019-04054-4.

17. Ашакаева Р.У., Асенова Б.К. Ет өнімдері үшін байытылған ақуызды– майлы эмульсиясын жаса-

у.// Наука и образование в современном мире: вызовы XXI века: матер.6-й междунар. науч.-практ. конф. – Нур-Султан, 2020. -С.50- 52.

References

1. Қазақстан Республикасы Стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігі. Ұлттық статистика бюросы.2025 жылғы 1 қазанға Қазақстан Республикасындағы қолда бар дәнді және бұршақ дақылдары. https://stat.gov.kz Қаралған күні: 07.09.2025.

2. Chen S., Tang C-H. Effect of varying β-conglycinin / glycinin ratios on the emulsifying and interfacial properties of soybean proteins.//Modern Food Science and Technology.-2016.-Vol.32(9).- P.62-68. DOI 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.9.010.

3. Conghui Liu, Xin Wang The physicochemical properties and stability of flaxseed oil emulsions: effects of emulsification methods and the ratio of soybean protein isolate to soy lecithin//Journal of the Science of Food and Agriculture - 2021. -Vol.101(15).-P.6407-6416. DOI 10.1002/jsfa.11311.

4. Shao Jiaqi,Yang Jing,Wu Ping, Jin, Weiping, Xiao Junxia. Effect of soy protein isolates obtained by weak-base synchronized membrane separation on nanoemulsion stability: A comparison with alkaline extraction/isoelectric precipitation and salt extraction//Food ChemistryArticle.- 2025.-Vol.495: 146471. DOI 10.1016/j.foodchem.2025.146471.

5. Bishunu Karki, Buddhi P. Lamsal, David Grewei, Anthony L. Functional properties of soy protein isolates produced from ultrasonicated defatted soy flakes//Journal of the American Oil Chemists' Society-2009.-Vol.86(10).-P.1021-1028. DOI 10.1007/s11746-009-1433-0.

6. Wenjie Xia,Wing Kie Siu, Leonar M.C. Linear and non-linear rheology of heat-set soy protein gels:Effects of selective proteolysis of β-conglycinin and glycinin// Food Hydrocollioids.-2021.-Vol.120(6):106962. DOI 10.1016/j.foodhyd.2021.106962.

7. Joyce Boye, Fatemeh Zare, Alison Pletch. Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed//Food Research international.-2010.-Vol.43(2).-P.414-431. DOI 10.1016/j.foodres.2009.09.003.

8. Dilek Dulgar Altiner, Şeyma Hallaç. The effect of soy flour and carob flour addition on the physicochemical, quality,and sensory properties of pasta formulations// International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences.-2020.-Vol.4(4).-P.406-417. DOI 10.31015/jaefs.2020.4.3.

9. Peanut and Soy Protein-Based Emulsion Gels Loaded with Curcumin as a New Fat Substitute in Sausages: A Comparative Study.//Gels.- 2025.- Vol. 11(1): 62 DOI 10.3390/gels11010062.

10. Tong Liu, Xinyu Zhen,Nan Zheng,Yaomei Ma, Yu Zhang, Hongyu Lei, Jiaxin Liu, Ruining Zhang, Jun Zhao. Functional properties and application potential of black soybean meal insoluble dietary fiber remodeled by ultrasound combined with ultrahigh pressure.//LWT. -2025.- Vol. 221: 117594. DOI 10.1016/j.lwt.2025.117594.

11. Ioana Stanciu Technological Process of Obtaining Sunflower Oil.//Current Approaches in Engineering Research and Technology.-Vol.9.- P.88-111. DOI 10.9734/bpi/caert/v9/2616.

12. Ji Yao Zhang, Ellen Kim, Peter Lawrence, High Oleic Sunflower Oil Alters the Proportions of n-6 and n-3 Polyunsaturated Fatty Acids in Young and Aging C57BL/6 Heart Tissue//The FASEB Journal.-2015.-Vol.29(S1). DOI 10.1096/fasebj.29.1_supplement.598.11.

13. Ankit Goyal, Vivek Sharma, Neelam Upadhayay, Sandeep Gill, Manvesh Sihag. Flaxseed and flaxseed oil: An ancient medicine & modern functional food//J Food Sci Technol.- 2014.-Vol.51(9).-P.1633-1653. DOI 10.1007/s13197-013-1247-9.

14. Selina Khan, SharminAkter Lisa, MoniraObaid Tocopherol content of vegetable oils/ fats and their oxidative deterioration during storage. //World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences.-2015.-.-Vol.4(4).-P.1537-1548.

15. Ting Lu,Yan Shen, Zi-Xuan Wu, Hong-Kai, Ao Li,Yong-Fu Wang. Improving the oxidative stability of flaxseed oil with composite antioxidants comprising gallic acid alkyl ester with appropriate chain length//LWT.- 2021.-Vol.138(10):110763. DOI 10.1016/j.lwt.2020.110763.

16. Oleg Shadyro,Anna Sosnovskaya,Irina Edimecheva. Effect of biologically active substances on oxidative stability of flaxseed oil//J Food Sci Technol.- 2020. -Vol.57(1).-P.243–252. DOI 10.1007/s13197-019-04054-4.

17. Ashakaeva R.U., Asenova B.K. Et өnimderi үshin bajytylғan aқuyzdy - majly jemul’ sijasyn zhasau.// Nauka i obrazovanie v sovremennom mire: vyzovy HHI veka: mater.6-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. - Nur-Sultan, 2020. -S.50- 52. [in Kazakh]

Авторлар туралы мәлімет

Байтукенова Ш.Б. - т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан, e-mail: baytukenova75@mail.ru;

Бақытбек М. - магистрант «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан, e-mail: mila9231115@gmail.com;

Байтукенова С.Б. - т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, «Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана қ., Казахстан, e-mail: saule7272 @mail.ru,

Костанова А.Т. - докторант НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина», Астана, Казахстан, e-mail: anel_kostanova@mail.ru.

Information about the authors

Baitukenova Sh.B. - Candidate of technical sciences, associate professor, ”S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University”, Astana, Kazakhstan, e-mail: baytukenova75@mail.ru;

Bakytbek M. - Master’ s student, «S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University», Astana, Kazakhstan, e-mail: mila9231115@gmail.com;

Baitukenova S.B. - Candidate of technical sciences, associate professor, JSC ”Kazakh University of technology and business named after K. Kulazhanov”, Kazakhstan, Astana, e-mail: saule7272 @mail.ru;

Kostanova A.T. - PhD student, «S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University», Astana, Kazakhstan, e-mail: anel_kostanova@mail.ru.

ҒТАМР 65.63.33 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1284**

ГУМИНДІ ЗАТТАРДЫҢ СҮТҚЫШҚЫЛДЫ ӨНІМДЕРДІҢ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІНЕ ЫҚПАЛЫ

[1]С.А. Карденов✉, [1]А.К. Игенбаев, [1]Ш.Б. Байтукенова, [2]С.Б. Байтукенова, [1]Ж.С. Ажгереева

[1]«С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан,
[2]«Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана, Қазақстан

✉ *Корреспондент-автор: Askerbekovsk@mail.ru*

Бұл мақалада қазіргі таңдағы өзекті мәселелердің біріне айналған сүт және сүтқышқылды өнімдер жайында болмақ. Сондай-ақ мақалада отандық және шетелдік ғалымдардың ғылыми жұмыстары мен зертеулері қарастырылып, соңғы жылдардағы жүргізілген зерттеу жұмыстарына байланысты жаңа технологиясы жетілдірілді.

Сүтқышқылды өнімдердің технологиясында гуминді заттарды қолдану мүмкіндіктері зерттеліп, олардың осы өнімдерге әсер ету ерекшеліктері көрсетілді. Гуминдік заттар топырақ пен судағы ең көп таралған органикалық қосылыстардың бірі болып табылады. Олар сүтқышқылды өнімдердің биологиялық құндылықтарына оң әсер ететін ерекше қасиеттерге ие. Гуминдік заттар биологиялық белсенді қосылыстар ретінде жаңа биологиялық белсенді заттардың көзі болып табылады. Калий гуматымен байытылған сүтқышқылды өнім айран өндіру технологиясын ойдағыдай жүзеге асыруға болатынын айта аламыз, осыған орай айранды гуматпен өндіру технологиясын жетілдірдік. Тәжірибелік зерттеулер нәтижесінде майлылығы 2,5% 1 л айранға 0,5% калий гуматын қосу негізделді.

Калий гуматымен байытылған айранның бірегей химиялық құрамы оның коммерциялық әлеуетін арттырады. Айрандағы сүтқышқылды бактериялар мен ұйытқылар оны пробиотиктерге жақындатады және сақтау кезінде органолептикалық қасиеттерін жақсартады. Бұл өнім әсіресе дәрумендер мен микроэлементтердің жетіспеушілігінен зардап шегетін адамдар үшін өте қажет. Айран ішек микрофлорасына оң әсер етіп, дұрыс тамақтануға ықпал етеді.

Зерттеу нәтижелері бойынша гумин қышқылдарымен байытылған айран алудың технологиясы мен рецептурасы жасалды. Бұл технология өндірісте қолдануға ыңғайлы. Калий гуматының ең тиімді концентрациясы 0,5% құрайды. Тәжірибе нәтижесінде гумин қосылған айранды тұтынуда теріс әсерлер мен асқынулар анықталмады және гуминдік заттармен байытылған айран өнімінің химиялық құрамын, энергетикалық құндылығын, микробиологиялық және pH көрсеткіштерін анықтадық.

Түйін сөздер: гуминдік заттар, калий гуматы, сүтқышқылды өнімдер, айран, сүтқышқылды бактериялар, ”Қазгумат” препараты, минералды-органикалық тыңайтқыш, дәрумендер.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ НА КАЧЕСТВО КИСЛОМОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

[1]С.А. Карденов✉, [1]А.К. Игенбаев, [1]Ш.Б. Байтукенова, [2]С.Б. Байтукенова, [1]Ж.С. Ажгереева

[1]НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина», Астана, Казахстан,
[2]АО «Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова», Астана, Казахстан,
e-mail: Askerbekovsk@mail.ru

В данной статье рассматриваются молоко и молочные продукты, ставшие одной из самых актуальных тем современности. Также дан обзор научных трудов и исследований отечественных и зарубежных ученых, а также новые технологии, разработанные и усовершенствованные в последние годы благодаря исследовательской работе.

В статье изучены возможности использования гуминовых веществ в технологии кисломолочных продуктов и показаны особенности их воздействия на эти продукты. Гуминовые вещества

являются одними из наиболее распространенных органических соединений в почве и воде. Они обладают уникальными свойствами, которые положительно влияют на биологическую ценность кисломолочных продуктов. Гуминовые вещества являются источником новых биологически активных соединений. Можно сказать, что технология производства кефира - молочнокислого продукта, обогащенного гуматом калия, может быть успешно реализована, в связи с этим нами усовершенствована технология производства кефира с гуматом калия. Экспериментальными исследованиями обоснована целесообразность добавления 0,5% гумата калия на 1 л кефира жирностью 2,5%.

Уникальный химический состав кефира, обогащенного гуматом калия, повышает его коммерческий потенциал. Молочнокислые бактерии и дрожжи в кефире приближают его к пробиотикам и улучшают его органолептические свойства при хранении. Этот продукт особенно необходим людям, страдающим от недостатка витаминов и микроэлементов. Кефир положительно влияет на микрофлору кишечника и способствует правильному питанию.

На основании результатов исследований разработаны технология и рецептура производства кефира, обогащенного гуминовыми кислотами. Эту технологию удобно использовать в производстве. Наиболее эффективная концентрация гумата калия – 0,5%. В результате эксперимента не выявлено отрицательных эффектов и осложнений от употребления кефира с гуминовыми веществами, определены химический состав, энергетическая ценность, микробиологические и pH показатели кефирного продукта, обогащенного гуминовыми веществами.

Ключевые слова: гуминовые вещества, гумат калия, кисломолочные продукты, кефир, кисломолочные бактерии, препарат «Казгумат», минерально-органическое удобрение, витамины.

EFFECT OF HUMIC SUBSTANCES ON THE QUALITY OF FERMENTED MILK PRODUCTS

[1]S.A. Kardenov✉, [1]A.K. Igenbayev, [1]Sh.B. Baitukenova, [2]S.B. Baitukenova, [1]Zh.S. Azhgereeva

[1]NAO «S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University», Astana, Kazakhstan,
[2]JSC «K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business» Astana, Kazakhstan,
e-mail: Askerbekovsk@mail.ru

This article discusses milk and dairy products, which have become one of the most pressing issues of our time. It also provides an overview of scientific works and research by domestic and foreign scientists, as well as new technologies developed and improved in recent years thanks to research work.

The article examines the possibilities of using humic substances in the technology of fermented milk products and shows the features of their impact on these products. Humic substances are among the most common organic compounds in soil and water. They have unique properties that have a positive effect on the biological value of fermented milk products. Humic substances are a source of new biologically active compounds. It can be said that the technology of producing kefir - a fermented milk product enriched with potassium humate, can be successfully implemented, and in this regard, we have improved the technology of producing kefir with potassium humate. Experimental studies substantiate the feasibility of adding 0.5% potassium humate per 1 liter of kefir with a fat content of 2.5%.

The unique chemical composition of kefir enriched with potassium humate increases its commercial potential. Lactic acid bacteria and yeast in kefir bring it closer to probiotics and improve its organoleptic properties during storage. This product is especially necessary for people suffering from a lack of vitamins and microelements. Yogurt has a positive effect on the intestinal microflora and promotes proper nutrition.

Based on the research results, a technology and recipe for the production of kefir enriched with humic acids have been developed. This technology is convenient to use in production, saving time and money. The most effective concentration of potassium humate is 0.5%. As a result of the experiment, no negative effects and complications from the use of kefir with humic substances were revealed, the chemical composition, energy value, microbiological and pH indicators of the kefir product enriched with humic substances

were determined.

Keywords: humic substances, potassium humate, lactic acid products, kefir, lactic acid bacteria, the drug ”Kazgumat”, mineral-organic fertilizer, vitamins.

Кіріспе. Қазіргі тамақ өнеркәсібі негізгі азықтық қажеттіліктерді қанағаттандырумен қатар адам денсаулығына оң әсерін тигізетін, биологиялық белесді компоненттермен байытылған функционалды өнімдерге деген сұранысты өсуімен сипатталады. Бұл контексте гумин заттары (ГЗ) - өсімдік және жануар қалдықтарының ыдырауы нәтижесінде түзілетін табиғи жоғары молекулалық полимерлер - ерекше қызығушылық тудырады [1]. Биологиялық белесінің кең спектріне (қабынуға қарсы, антиоксиданттық, сорбциялық) ие болуына байланысты, ГЗ азық өнімдерін байыту үшін перспективалы ингредиенттер болып табылады. Алайда оларды сүт өнеркәсібінде, әсіресе, қышқыл сүт өнімдерінде қолдану бірқатар технологиялық және органолептикалық қиындықтармен байланысты. Осылайша, бұл зерттеудің мақсаты гумин заттарының қышқыл сүт өнімдерінің сапасына қатысты физика-химиялық, микробиологиялық және органолептикалық көрсеткіштеріне әсерін кешенді талдау болып табылады. Зерттеу гипотезасы ГЗ-тың оңтайландырылған дозалары ферментация процесіне және өнімнің сезгіш сипаттамаларына жағымсыз әсерін тигізбей, өнімнің функционалдық қасиеттерін жақсарта алады деген болжамға негізделген.

Әлеуметтік – экологиялық проблемалар. Жер шарындағы экологиялық жағдайдың нашарлауы, халықтың дәрумендер мен микроэлементтердің жетіспеушілігінен зардап шегуі, қала ауасының ластануы және патогенді микроорганизмдердің таралуы өзекті мәселелерге айналды. Гуминды заттар табиғи органикалық заттардың және қоршаған ортада кездесетін ең көп таралған органикалық қосылыстардың өкілі ретінде қоршаған ортаны тазарту және қалпына келтіру үшін қолданылады [2]. Дәрумендер - адамдардың денсаулығын сақтауда шешуші рөл атқарады. Олардың тотығу, қабыну, иммундық, генетикалық және эпигенетикалық реттеудегі рөлі оларды жасушалық гомеостазды сақтауды үшін маңызды етеді [3].

Гумин заттары - топырақта, шөгінділерде және су айдындарында кең таралған, топырақ органикалық заттарының негізгі құрамдас бөлігін 60-70 құрайтын табиғи макромолекулалық органикалық қосылыс [4].

Гумин қышқылдары – топырақ қасиеттерің, өсімдіктердің өсуін және агрономиялық көрсеткіштерді жаөсартуда маңызды рөл атқаратын органикалық молекулалар. Гуминды қышқылдар көздеріне көмір, қоңыр көмір, топырақ және органикалық заттар жатады. Соңғы жылдары ауыл шаруашылығы өндірісінің тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін дақылдарды өндіруде гумин қышқылына негізделген өнімдер қолданылуда [5].

Дәл осы функционалдық топтар олардың негізгі қасиеттерін анықтайды:

1. Антиоксиданттық қасиеттер - металл иондарын хелаттау және еркін радикалдарды бейтараптау қабілеті гумин заттарын табиғи тиімді антиоксидантқа айналдырады, бұл өнімдердің сақталу мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді.

2. Пребиотикалық әлеует - гумин заттарының кейбір фракциялары, атап айтқанда төмен молекулалық фракциялардағы гумин қышқылдары, ішек микрофлорасының пайдалы өкілдері (бифидобактериялар және лактобациллалар сияқты) үшін селективті субстрат ретінде қызмет ете алады.

3. Антимикробтік қасиеттер - гумин заттары бірқатар патогенді және шартты түрде патогенді микроорганизмдерге (мысалы, Escherichia coli, Staphylococcus aureus) қарсы тежеуші әсер көрсетеді, бірақ сүтқышқылды ашытқы саңырауқұлақтарының белесін бәсеңдетпейді.

4. Сорбциялық қабілет - гумин заттары улы заттарды, ауыр металдарды және аллергендерді байланыстырып, шығаруға қабілетті, бұл өнімнің детоксикациялық қасиеттерін күшейтеді.

Гуминдік заттар топырақ пен судағы ең көп таралған органикалық қосылыстардың бірі бо-

лып табылады. Олар сүтқышқылды өнімдердің биологиялық құндылықтарына оң әсер ететін ерекше қасиеттерге ие [6].

Сүтқышқылды өнімдер елдің мәдени мұрасында терең тамыр жайған бұл сүт өнімдері бай тағамдық құндылығы үшін ұзақ уақыт бойы бағаланып келеді. Дәмінен басқа, бұл сүтқышқылды өнімдер пробиотикалық микроорганиздердің көзі ретінде айтарлықтай әлеуетке ие, бұл тұтынушылардың денсаулығына пайдалы болуы мүмкін [7].

Гуминдік заттар биологиялық белсенді қосылыстар ретінде жаңа биологиялық белсенді заттардың көзі болып табылады. Мысалы, медициналық лигнин (полифепан) клиникалық тәжірибеде кеңінен қолданылады. Гуматтар - өсімдік талшықтарының ыдырауы кезінде топырақта түзілетін табиғи элементтер, натрий немесе калий тұздары түрінде болады [1].

Гумин қышқылдары негізінде жасалған отандық препараттардың биорегуляциялық қасиеттері микробқа қарсы белсенділігін, биологиялық белсенділігін және зиянсыздығын көрсетті. Бұл гумин қышқылдарының экологиялық қауіпсіз отандық препараттарын қолданудың болашағы зор екенін көрсетеді.

Зерттеудің өзектілігі - гуминдік заттардың сүтқышқылды өнімдердің биологиялық құндылығын зерттеу және жетілдіру. Жаңалығы – гуминдік заттардың сүтқышқылды өнімдердің технологияларында қолдану мүмкіндігі, әсер ету ерекшеліктері және гуминдық заттармен байытылған дайын өнімнің функционалдық-технологиялық және құрылымдық-механикалық қасиеттерінің өзгеру сипаты зерттеледі.

Ғылыми зерттеудің мақсаты - Қазақстанда өндірілетін көмірді, әсіресе Сарыадыр кен орнының көмірін тотықтыру арқылы «Көмір химиясы және технологиясы институты» ЖШС қазақстандық ғалымдары алған «Қазгумат» препаратынан калий гуматы негізінде айран алудың рецептурасы мен технологиясын жасау.

Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды:

- гуминдік заттарды алу тәсілдерін таңдау және негіздеу;

- гуминдік заттардың сүтқышқыл өнімі сынамасындағы өзгерістерін және сапасына әсерін зерттеу;

- гуминдік заттарды ғылыми негіздеу және физика-химиялық қасиеттерін зерттеу нәтижесінде айран өндіру технологиясында тиімді қолдану арқылы функционалды бағыттағы өнім алу;

- айран өнімінің сапалық көрсеткіштерін және гуминдік заттардың әсерін зерттеу;

- гуминдік заттармен байытылған айран өнімінің химиялық құрамын, энергетикалық құндылығын, микробиологиялық және pH көрсеткіштерін анықтау.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу объектісі ретінде «Қазгумат» препараты негізіндегі калий гуматымен (0,1%; 0,5% және 1% концентрацияда) байытылған айран таңдалды. Бақылау үлгісі ретінде қоспасыз дәстүрлі әдіспен дайындалған айран қолданылды.

Негізгі зерттеу материалдары: майлылығы 2,5% болған жаңа сауылған сиыр сүті, сапасы және қауіпсіздігі қазақстандық стандарттарға сәйкес келеді.

Дәстүрлі айран алу үшін қолданылатын бактериялық ашытқы Kefir 30 ұйытқы сынамы (әдістемеде көрсетілгендей 10 мл).

Байытқыш «Қазгумат» препараты негізіндегі калий гуматы. Препарат «Көмір химиясы және технологиясы институты» ЖШС ғалымдарының Сарыадыр кен орнының В2 маркалы қоңыр көмірін тотықтыру арқылы алынған. Бұл әдіс ультрадыбыстық өңдеуді және атмосфералық оттегіні қолдануды қамтиды, нәтижесінде суда еритін металлорганикалық хелаттық кешендері бар калий гуматы түзіледі.

Айран өндірісінің технологиясы - калий гуматымен байытылған айран С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің тәжірибелік-өндірістік цехында резервуарлық әдіспен дайындалды. Технологиялық процесс 1-сұлбаға сәйкес жүргізілді.

Зерттеу жұмысы кешенді түрде жүргізіліп, өнімнің сапасы мен қауіпсіздігінің келесі көрсеткіштері бағаланды: Қышқылдық титрлеу әдісімен (°Т) анықталды. pH көрсеткіші pH-метр көмегімен өлшенді. Майлылық гравиметриялық әдіспен (Гербер әдісі) анықталды. Ақуыз құрамы жоғары өнімді сұйық хроматография әдісімен анықталды. Макро- және микроэлементтер құрамы атом-абсорбциялық спектрометрия және масс-спектрометрия әдістері қолданылып, кальций, темір және басқа элементтердің мөлшері анықталды.

Калий гуматының сипаттамасы: «Қазгумат» препаратының элементтік құрамы (C, H, O, N, S), функционалдық топтары (карбоксил, фенолды) және органолептикалық көрсеткіштері (түс, pH) сәйкес мемлекеттік стандарттар бойынша зерттелді.

Микробиологиялық талдаулар жүргізу барысында микроорганизмдердің жалпы саны стандартты агарлық орталардағы есу әдісімен анықталды.

Органолептикалық бағалау параметрлері арқылы анықталды: түс (ақтан сүт түстес аққа дейін), консистенция (біртектілік, тұтқырлық), иіс (таза, сүтқышқылды, бөтен иіссіз) және дәм (таза, ашықшыл, сәл ашқылтым).

Әрбір сынама (0,1%, 0,5%, 1% гумат қосылған және бақылау үлгісі) 5 балдық жүйе бойынша бағаланды.

Алынған барлық нәтижелер статистикалық өңдеуден өткізілді. Әрбір тәжірибе 3-5 рет қайталанды. Алынған нәтижелерді өңдеу үшін вариациялық статистика әдістері (орташа мән, стандартты ауытқу) қолданылды. Нәтижелердің статистикалық маңыздылығы Стьюдент критериі бойынша ($p<0,05$ деңгейінде) бағаланды.

Нәтижелер және талқылау. Ферментация үдерісі мен микробиологиялық көрсеткіштерге әсері. Зерттеулер гумин заттарының (ГЗ) сүтқышқылды микроорганизмдеріне әсерінің екіжақты екенін көрсетеді. Төмен мөлшерде (0,001-0,01%) ГЗ пробиотикалық сипаттамалары (Lactobacillus acidophilus, Bifidobacterium spp.) өсуінің ынталандырғышы ретінде әрекет ете алады. Бұл олардың жасуша мембраналарының қоректік заттарға өткізгіштігін жақсарту және ортаның pH-ын тұрақтандыра отырып, буферлік функцияны атқару қабілетімен байланысты. Алайда, мөлшері жоғарылаған кезде (>0,05%) қышқыл түзілу жылдамдығының баяулауы байқалуы мүмкін, бұл бактериялар метаболизмі үшін қажет кальций иондарын байланыстырумен және гумин заттарының күшті антимикробтік әсерімен түсіндіріледі [8].

Сондықтан, негізгі параметр - гумин заттарының ашытқы үдерісін тежеместен, пребиотикалық әсері қамтамасыз ететін мөлшерін таңдау болып табылады.

Физика-химиялық және құрылымды-механикалық қасиеттерге әсері. Гумин заттары реологиялық сипаттамалар мен ұйытқың құрылымына айтарлықтай әсер етеді.

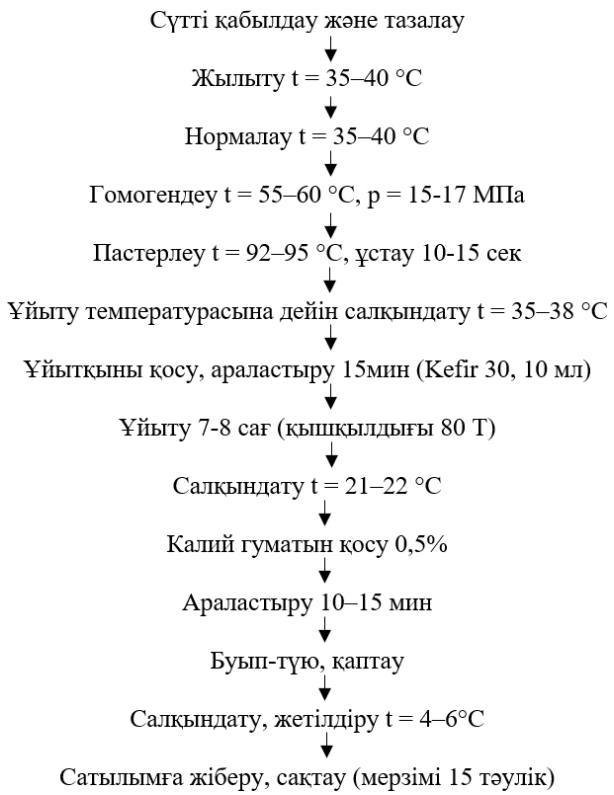
Гумин заттарының оңтайлы мөлшерінде олар pH-дың төмендеу динамикасын бұзбайды, бұл стандартты ашыту уақытын қамтамасыз етеді.

Гумин заттарын 0,005-0,02% мөлшерінде енгізу айранның тұтқырлығын арттыруға және сұйықтық бөлінуінің (синерезис) азаюына ықпал етеді. Бұл гумин заттары сүт ақуыздарымен (казеин) өзара әрекеттесуінің нәтижесінде ылғалды жақсы ұстайтын берік ақуыздық-гумин матрицасының қалыптасуымен түсіндіріледі [9].

Гумин заттарының антиоксиданттық қасиеттері майлардың тотығуына жол бермейді, бұл майлылығы жоғары өнімдер (қаймақ, ірімшік) үшін өте маңызды болып табылады және олардың органолептикалық тұрақтылығын ұзартады.

Зерттеу материалы ретінде елімізде өндірілетін калий гуматы қолданылды. Ол «Көмір химиясы және технологиясы институты» ЖШС қазақстандық ғалымдарының Сарыадыр кен орнының көмірін тотықтыру арқылы алынған «Қазгумат» препаратынан өндірілді. Содан кейін С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің сүт өнімдерін қайта өңдеуге арналған тәжірибелік-өндірістік цехында резервуарлық әдіспен айран дайындалды. Жаңа сүтқышқылды өнімді алу техноло-

гиясы 0,1%, 0,5% және 1% калий гуматының концентрацияларымен байытылды, қышқылды өнім алу технологиясы 1-ші сұлба көрсетілген.



Сұлба 1 - Калий гуматымен байытылған айранның технологиялық сұлбасы

«Қазгумат» - қоңыр көмірді тотықтыру арқылы алынатын қара қоңыр зат - калий гуматы негізіндегі тұрмыстық минералды-органикалық тыңайтқыш. Тыңайтқышты алу технологиясын «Көмір химиясы және технологиясы институты» жауапкершілігі шектеулі серіктестігі мен өндіруші «Казтехноуголь» ЖШҚ ғылыми-өндірістік бірлестігінің авторлар тобы әзірледі. Технология ультрадыбыстық және атмосфералық оттегінің тотыққан В2 маркалы қоңыр көмірге біріктірілген әсеріне негізделген, бұл ұсақ мицеллалардың пайда болуына әкеледі. Осылайша алынған калий гуматы құрамында С–О, С–ОН және С–NH бос функционалды топтары бар суда еритін металлорганикалық хелат кешендері бар [10]. Талдау нәтижелерінің негізінде қолда бар қоректік заттар 1-кестеде көрсетілгендей келесі формаларда:

1-кесте. «Қазгумат» құрамындағы қоректік заттар

№	Қоректік заттар	Құрамы, %
1	Гуминдік заттар	53-59
2	Калий (K)	12.53
3	Азот (N)	1.1
4	Оттегі (O)	16.57
5	Кремний (Si)	16.7

2-ші кестеде «Қазгумат» калий гуматының химиялық құрамы, 3-ші кестеде «Қазгумат» калий гуматының сипаттамасы, 4-ші кестеде органолептикалық және 5-ші кестеде рентгенологиялық көрсеткіштері, ал 6-шы кестеде калий гуматының химиялық құрамы көрсетілген.

2-кесте. Көміртегінің (C), сутегінің (H), азоттың (N), күкірттің (S) және оттегінің (O) оташа мөлшері

Атауы	Құрамы, %					Атомдық қатынас				Химиялық формуласы
	C	H	N	S	O	C/H	C/O	C/N	C/S	
Калий гуматы	22.205	1.9065	3.495	0.6775	20.4435	0.979	0.447	7.411	87.49	C95H95O65N15S1
	Атомдық үлесі					Пайыздық қатынас				
	1.85	1.89	0.25	0.02	1.28	C/H	C/O	C/N	C/S	

3-кесте. «Қазгумат» калий гуматының сипаттамасы

Үлгі	Техникалық сипаттама, %			Құрғақ затқа шаққандағы элемент мөлшері, мас. %										Фуникционалдық топтардың сипаттамасы, мг-экв/г	
	Wrt	Ar	Vd	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Fe	F	Карбоксил	Фенол
Калий гуматы	44.8	5.5	42.69	35.95	30.16	0.44	0.25	8.57	1.12	0.14	21.05	1.47	0.84	0.5	0.7

4-кесте. Калий гуматының органолептикалық көрсеткіштері

№	Көрсеткіш атауы	Норма НБ	Нақты көрсеткіштер	Сынау әдістері бойынша НБ
1	Сыртқы түрі, түсі	Қара қоңырдан қараға дейінгі сұйықтық	Қою қоңыр түсті сұйықтық	МЕМСТ 9097-82
2	Сутекті көрсеткіш, pH	11.6	10-11.6	МЕМСТ 27979-88
3	Гумин қышқылдарының массалық үлесі	54.86	56	МЕМСТ 9517-94

3 кестеде келтірілген органолептикалық сипаттамаларға әсері көрсетілген. Бұл ең сыни аспект болып табылады. Гумин заттары тіпті аз мөлшерде енгізу өнімге тұтынушы үшін әдеттен тыс болатын ашық-қоңыр немесе крем түс береді. Сонымен қатар, жеңіл «топырақты» немесе «дегть тәрізді» дәмі пайда болады. Бұл әсерлерді азайту үшін төмендегі қағидаттар қолданылады:

- түсі мен дәмі азырақ байқалатын тазартылған (ультрасүзгіленген) ГЗ фракцияларын пайдалану;

- ГЗ-ті бөтен дәмдерді бүркеп тастайтын хош иістендіргіштермен (ваниль, какао, жидектер) біріктіру;

- ГЗ-ті микрокапсулаланған түрде енгізу, бұл олардың өнімнің дәм-хош иіс матрицасымен тікелей байланысынан оқшаулайды [11].

5-кесте. Калий гуматының рентгенологиялық көрсеткіші

Табиғи радионуклидтердің меншікті тиімді белсенділігі, БК/кг	Көп емес	12.0	МЕМСТ 301008-94

6-кесте. Калий гуматының химиялық құрамы

№	Анықталатын көрсеткіштер, мкг/кг $1x10^{-6}$	Тұтынушы үлгісі
		Калий гуматы
1	Алюминий (Al)	1497
2	Ванадий (V)	4.91
3	Гадолиний (Gd)	1.80
4	Диспрозий (Dy)	2.04
5	Темір (Fe)	4849
6	Иттербий (Yb)	0.900
7	Иттрий (Y)	5.33
8	Калий (K)	28.1
9	Калций (Ca)	1197
10	Кобальт (Co)	1.02
11	Лантан (La)	5.99
12	Магний (Mg)	503
13	Марганец (Mn)	102
14	Мыс (Cu)	7.78
15	Мышьяк (As)	1.32
16	Натрий (Na)	5.51
17	Неодим (Nd)	н/о
18	Празеодим (Pr)	6.59
19	Рубидий (Rb)	1.38
20	Самарий (Sm)	0.958
21	Қорғасын (Pb)	1.44
22	Селен (Se)	1.26
23	Күміс (Ag)	0.491
24	Скандий (Se)	1.14
25	Стронций (Sr)	59.9
26	Молбиден(Mo)	0.05

Калий гуматымен байытылған жаңа сүтқышқылды өнімге эксперименттік зерттеу сынамалары жүргізілді. Тәжірибеде 2,5% сүттен жасалған калий гуматы қосылған айран, зерттеу

нысаны ретінде қолданылды. Жалпы көлемі 5 литр айран дайындалды: 3 литрі тәжірибелік сынамалар үшін, 2 литрі бақылау сынамасы. Тәжірибелік материал ретінде калий гуматының (0,25%, 0,5% және 1%) ерітінділері пайдаланылды. Бақылау сынамасы 2 литр айраннан тұрды және ешқандай қоспасыз Алматы технологиялық университетіне (АТУ) жіберілді. Тәжірибелік айранның әр литріне калий гуматының (0,25%, 0,5%, 1%) ерітінділері қосылды.8 оқытушыдан тұратын дегустациялық топ нәтижелерді бағалады. Нәтижелерді талдау негізінде ең оңтайлы және қолайлы сынама ретінде 0,5% калий гуматы қосылған сынама таңдалды.0,1%, 0,5%, 1% калий гуматының концентраттарымен байытылған айранның органолептикалық көрсеткіштері зерттелді. Зерттеу нәтижелері 7-ші кестеде көрсетілген.

7-кесте. Калий гуматымен байытылған айран

№	**Көрсеткіштер**	**Қазгумат 0.1% қосылған айран**	**Қазгумат 0.5% қосылған айран**	**Қазгумат 1% қосылған айран**
1	Органолептикалық бағалау	I	II	III
2	Майлылығы, %	2.5	2.5	2.5
3	Қышқылдығы, ^{0}Т	85	87	90
4	pH	4,5	4,43	4,3
5	Түсі	Ақ	Сүт түстес ақ	Ақ сұр

Калий гуматымен байытылған айран зерттеулер көрсеткендей, жалпы химиялық құрамымен ерекшеленеді, бұл оған айтарлықтай коммерциялық мүмкіндік береді. Ашыған сүт өнімі айранды потенциалды пробиотикалық деп санауға болады, сақтау кезінде сүтқышқылы бактериялары мен ұйытқылары болуына байланысты оның органолептикалық көрсеткіштері жақсы деңгейде болды.

Дегустация кафедра оқытушылары үшін, сонымен қатар Көмір химиясы және технологиясы институтының оқытушылары мен еріктілері үшін ұйымдастырылды.

Тәжірибе. Өнімдегі ақуыздың құрамын жоғары өнімді сұйық хроматография әдісімен анықтау.

Зерттеу нысаны дүкеннен (Адал) сатып алынған майлылығы 2,5% айран болды. Барлығы 1 литр айран алынды, 0,25 мл 3 түрлі ыдысқа құйылды, бақылау үлгісіне 0,25 мл айран қалдырылды. Жұмысқа тәжірибелік материал ретінде (0,1; 0,5 және 1)% калий гуматы ерітінділері қолданылды. Дегустация АТУ-нің 4 оқытушысы мен 10 студенті үшін өткізілді. Алынған нәтижелер бойынша 0,5% қосу арқылы ең қолайлы және ұтымды модель таңдалды. Дайындалған сынама Алматы қаласындағы Алматы технологиялық университетінің тамақ өнімдерінің сапасы мен қауіпсіздігін бағалау зертханасында ақуыздың өзгеруіне зерттелді.

Зерттеу нәтижесі 0,5% калий гуматы қосылған айранның макроэлементтік құрамының өзгергенін, яғни бақылау айранымен салыстырғанда макроэлементтердің мөлшерінің жоғарылағанын көрсетті. Мысалы, бақылау айранында 0,107 мг темір және 116 мг кальций болса, 0,5% гумат қосылған айранда 0,122 мг темір және 157,53 мг кальций болған. Бұл нәтиже макронутриенттердің сипатының жоғарылауын көрсетеді.

Алынған мәліметтер негізінде келесі қорытындылар жасалды: калий гуматы негізінде айран дайындаудың рецептурасы мен технологиясы жасалды. Әзірленген технология қарапайым, өндірісте қолдануға ыңғайлы және көп уақытты қажет етпейді. Зерттеу барысында оңтай-

лы ерітінді 0,5% концентрациядағы калий гуматы екені анықталды. Ғылыми тәжірибелердің нәтижелері гуминдік заттармен байытылған айран өнімдерін тәжірибе жүзінде қолдану кезінде ешқандай жанама әсерлер немесе салдарлар байқалмағанын көрсетеді.

Бұл бағытта әлі де клиникалық зерттеулер жалғасып жатқанын ескеріп, денсаулыққа әсері жөнінде түбегейлі ғылыми қорытынды жасау үшін қосымша дәлелдер қажеттігі бар екендігін атап өтеміз. Осыған байланысты тұжырымдардың дәлелдік деңгейі нақтыланып, болашақ ғылыми зерттеу бағыттарында анықталады.

Қорытынды. Сонымен, айран өндіру технологиясында оны калий гуматымен байыту арқылы оңтайлы нәтиже алуға болатындығы анықталды. Осылайша гуматты қолдану арқылы айран өндіру технологиясын жетілдіру мүмкіндігі туралы қорытынды жасалды.

Зерттеулер барысында 2,5% майлылықтағы 1 литр айранға 0,5% калий гуматын қосу ұсынылды.

Калий гуматымен байытылған айранның құрамы ерекше, бұл оның коммерциялық құндылығын арттырады. Бұл сүт өнімі сүтқышқылы бактериялары мен ұйытқылардың болуына байланысты пробиотикалық қасиеттерге және жақсы органолептикалық қасиеттерге ие. Айран – өте пайдалы өнім, әсіресе витаминдер мен микроэлементтер тапшылығы бар адамдар үшін. Сүтқышқылы өнімдер ішек микробиомасының дұрыс тамақтануына және теңгеріміне ықпал етеді.

Зерттеу нәтижелері бойынша негізінен гумин қышқылдарын қолдану арқылы айран алудың рецептурасы мен технологиясы жетілдірілді. Жасалған технологияны өндірісте пайдалану оңай: ол көп уақыт пен қаржылық шығындарды қажет етпейді. Зерттеулер көрсеткендей, ең қолайлы ерітінді – 0,5% концентрациясы бар калий гуматы. Ғылыми-экономикалық зерттеулер және алынған нәтижелер зерттеу кезеңінде гуминді заттармен байытылған айран өндіру кезінде теріс салдарлардың байқалмағанын көрсетеді.

Әрі қарайғы зерттеулердің болашақтағы перспективалары келесіде:

- гумин заттарының нақты фракцияларының (гумин және фульвоқышқылдары) пробиотиктердің жекелеген штаммдарына әсерін зерттеу;

- қышқыл сүт өнімдерінің әртүрлі рецептураларына ГЗ енгізудің стандартталған

әдістерін әзірлеу;

- ГЗ-мен байытылған өнімдердің функционалдық тиімділігін in vivo растау үшін кең

көлемді клиникалық зерттеулер жүргізу.

Гуматты тағамдық қоспа ретінде толық пайдалану біздің ғылыми жұмыстарымыз бойынша жалғастырылуда. Патентте (US 5626881A - «Humate dietary supplement») адам ағзасына қоректік заттарды сіңіруді, ас қортуды жақсарту және диетаны толықтыру мақсатында гуматтан тұратын диеталық қоспа ұсынылған. Адам ішке тұтынуға арналған (тамақпен, сусынмен, капсула немесе таблетка түрінде). Ғылыми-тәжірибелік модель ретінде қолданылып жұмыстар атқарылуда.

Қорытындылай келе, калий гуматымен байытылған сүтқышқылды өнімі жаңа қасиеттерге ие, адам денсаулығына пайдалы. Сонымен қатар экономикалық тиімділікті төмендетпей жаңа өнімдерді дайындауға мүмкіндік бере отырып, өзінің профилактикалық және емдік қасиеттерін сақтайды.

Әдебиеттер

1. Van Rensburg, C.E.J. The Antiinflammatory Properties of Humic Substances: A Mini Review. //Phytotherapy Research. -2015. -Vol.29(6). -P.791-795. DOI 101002/ptr.5319.

2. Xiong-Xin Peng, Shuang Gai, Kui Cheng & Fan Yang. Roles of humic substances redox activity on environmental remediation. // J. Hazardous Materials. -2022. -Vol. 435:129070. DOI 10.1016/j.jhazmat.2022.129070.

3. Gana, W., et al. Analysis of the Impact of Selected Vitamins Deficiencies on Health. //Nutrients. -2021, -Vol.13(9): 3163. DOI 10.3390/nu13093163.

4. Ma, Y., Cheng, X., & Zhang, Y. The Impact of Humic Acid Fertilizers on Crop Yield and Nitrogen Use Efficiency: A Meta-Analysis. //Agronomy.-2024, -Vol.14(12):2763. DOI 10.3390/agronomy14122763.

5. Ampong, K., et al. Understanding the Role of Humic Acids on Crop Production and Soil Health. //Frontiers in Agronomy. -2022. -Vol.4. -P. 1-14. DOI 10.3389/fagro.2022.848621.

6. Фасхутдинов М. Ф., Арынов К. Т., Нуркеева А. Б., Берикова У., Ошакбаев М. Т. Новые гуминовые удобрения из казахстанских бурых углей, обогащённых природными биологически активными веществами: получение, свойства и ростстимулирующая активность. //Chemical Journal of Kazakhstan. -2020. - Т. 4.(72)- С.113-118.

7. Anuarbekova, S., Bekshin, Z., Shaikhin, S., Alzhanova, G., Sadykov, A., Temirkhanov, A., Sarmurzina, Z., & Kanafin, Y.N. Exploring the Antimicrobial and Probiotic Potential of Microorganisms Derived from Kazakh Dairy Products. //Microbiology Research, -2024, -Vol.15(3), -P. 1298-1318. DOI 10.3390/microbiolres15030087.

8. Maguey Gonzalez J. A., Gomez-Rosales S., Angeles M. L., Lopez-Hernandez L. H., Rodriguez-Hernandez E., Solís-Cruz B., Hernandez-Patlan D., Merino-Guzman R., Tellez-Isaias G. Effects of humic acids on the recovery of different bacterial strains in an in vitro chicken digestive model. // Res. Vet. Sci. -2022. -Vol. 145. -P. 21-28. DOI 10.1016/j.rvsc.2022.01.004.

9. Vaskova, J., Velika, B., Pilatova, M., Kron, I., & Vasko, L. Therapeutic Efficiency of Humic Acids in Intoxications. //Frontiers in Pharmacology. -2023. -Vol. 13(4):971 DOI 10/3390/life13040971.

10. Konysbaeva D., Yermagambet B., Kassenova Zh., Gorbulya V., Kazankapova M., Khaimuldinova A.Physico-Chemical Parameters of Humic Substances of Brown Coal and Their Effect on the Growth of Phoenix dactylifera //OnLine Journal of Biological Sciences. -2023. -Vol. 23(4). -P.504-510. DOI 10.3844/ojbsci.2023.504.510.

11. Hudak, M., Semjon, B., Marcincakova, D., Bujnak, L., Nad, P., Korenekova, B., Nagy, J., Bartkovsky, M., Marcincak, S. Effect of Broilers Chicken Diet Supplementation with Natural and Acidified Humic Substances on Quality of Produced Breast Meat. //Animals. -2021. -Vol. 11(4):1087 DOI 10.3390/ani11041087.

References

1. Van Rensburg, C.E.J. The Antiinflammatory Properties of Humic Substances: A Mini Review. //Phytotherapy Research. -2015. -Vol.29(6). -P.791-795. DOI 101002/ptr.5319.

2. Xiong-Xin Peng, Shuang Gai, Kui Cheng & Fan Yang. Roles of humic substances redox activity on environmental remediation. // J. Hazardous Materials. -2022. -Vol. 435:129070. DOI 10.1016/j.jhazmat.2022.129070.

3. Gana, W., et al. Analysis of the Impact of Selected Vitamins Deficiencies on Health. //Nutrients. -2021, -Vol.13(9): 3163. DOI 10.3390/nu13093163.

4. Ma, Y., Cheng, X., & Zhang, Y. The Impact of Humic Acid Fertilizers on Crop Yield and Nitrogen Use Efficiency: A Meta-Analysis. //Agronomy.-2024, -Vol.14(12):2763. DOI 10.3390/agronomy14122763.

5. Ampong, K., et al. Understanding the Role of Humic Acids on Crop Production and Soil Health. //Frontiers in Agronomy. -2022. -Vol.4. -P. 1-14. DOI 10.3389/fagro.2022.848621.

6. Fashutdinov M. F., Arynov K. T., Nurkeeva A. B., Berikova U., Oshakbaev M. T. Novye guminovye udobrenija iz kazahstanskih buryh uglej, obogashhjonnyh prirodnymi biologicheski aktivnymi

veshhestvami: poluchenie, svojstva i roststimulirujushhaja aktivnost’. //Chemical Journal of Kazakhstan. -2020. - T. 4.(72)- S.113-118.[in Russian]

7. Anuarbekova, S., Bekshin, Z., Shaikhin, S., Alzhanova, G., Sadykov, A., Temirkhanov, A., Sarmurzina, Z., & Kanafin, Y.N. Exploring the Antimicrobial and Probiotic Potential of Microorganisms Derived from Kazakh Dairy Products. //Microbiology Research, -2024, -Vol.15(3), -P. 1298-1318. DOI 10.3390/microbiolres15030087.

8. Maguey Gonzalez J. A., Gomez-Rosales S., Angeles M. L., Lopez-Hernandez L. H., Rodriguez-Hernandez E., Solís-Cruz B., Hernandez-Patlan D., Merino-Guzman R., Tellez-Isaias G. Effects of humic acids on the recovery of different bacterial strains in an in vitro chicken digestive model. // Res. Vet. Sci. -2022. -Vol. 145. -P. 21-28. DOI 10.1016/j.rvsc.2022.01.004.

9. Vaskova, J., Velika, B., Pilatova, M., Kron, I., & Vasko, L. Therapeutic Efficiency of Humic Acids in Intoxications. //Frontiers in Pharmacology. -2023. -Vol. 13(4):971 DOI 10/3390/life13040971.

10. Konysbaeva D., Yermagambet B., Kassenova Zh., Gorbulya V., Kazankapova M., Khaimuldinova A.Physico-Chemical Parameters of Humic Substances of Brown Coal and Their Effect on the Growth of Phoenix dactylifera //OnLine Journal of Biological Sciences. -2023. -Vol. 23(4). -P.504-510. DOI 10.3844/ojbsci.2023.504.510.

11. Hudak, M., Semjon, B., Marcincakova, D., Bujnak, L., Nad, P., Korenekova, B., Nagy, J., Bartkovsky, M., Marcincak, S. Effect of Broilers Chicken Diet Supplementation with Natural and Acidified Humic Substances on Quality of Produced Breast Meat. //Animals. -2021. -Vol. 11(4):1087 DOI 10.3390/ani11041087.

Авторлар туралы мәлімет

Карденов С.А. - т.ғ.к., қауымдастырылған профессор,«С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан,e-mail: Askerbekovsk@mail.ru;

Игенбаев А.К. - PhD доктор, қауымдастырылған профессор, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан,e-mail:aidyn_mamyt@mail.ru;

Байтукенова Ш.Б. - т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, «С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан, e-mail: baytukenova75@mail.ru;

Байтукенова С.Б. - т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, «Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана, Казахстан,e-mail: saule7272 @mail.ru;

Ажгереева Ж.С. - т.ғ.м., докторант, «С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Казахстан, Астана, Қазақстан,e-mail: zhuldyz_09.11@mail.ru.

Information about the authors

Kardenov S.A. -candidate of technical sciences, associate professor, NAO ”S.Seifullin Kazakh agrotechnical research university”, Astana, Kazakhstan,e-mail: Askerbekovsk@mail.ru;

Igenbaev A.K. -PhD doctor, associate professor, NAO”S. Seifullin Kazakh agrotechnical research university”, Astana, Kazakhstan, e-mail: aidyn_mamyt@mail.ru;

Baytukenova Sh.B. - candidate of technical sciences, associate professor, NAO ”S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University”, Astana, Kazakhstan,e-mail: baytukenova75@mail.ru;

Baitukenova S.B. -candidate of technical sciences, associate professor, JSC ”K. Kulazhanov Kazakh University of technology and business”, Astana, Kazakhstan,e-mail: saule7272 @mail.ru;

Azhgereeva Zh.S. -candidate of technical sciences, doctoral student of NAO ”S.Seifullin Kazakh agrotechnical research university”, Astana, Kazakhstan, Kazakhstan,e-mail: zhuldyz_09.11@mail.ru.

IRSTI 65.59.03 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1331**

SHEEP MEAT AND PLANT ANTIOXIDANTS IN THE TECHNOLOGY OF HIGH NUTRITIONAL-VALUE MEAT ROULADE: A SYSTEMATIC REVIEW

A.E. Abdurasulova, B.A. Rskeldiev

Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

Corresponding author: abdurasulova.aigerim@mail.ru

The relevance of this work is due to the need to develop functional meat products with increased nutritional value that are also resistant to oxidative degradation, which is exacerbated in red meat due to the presence of heme pigments and reactive lipid fractions. The research hypothesis is that combining sheep meat with the bioactive components of sea buckthorn and grape seeds will create a biochemically sound antioxidant platform for meat roulade, reducing oxidative losses and stabilising quality during storage. The aim of the article is to critically synthesise current data on the nutritional value and technological characteristics of lamb, as well as on the composition and functional effects of sea buckthorn and grape seeds in meat systems. The methods included a systematic review of publications from 2015 to 2025, searching in English, Russian, and Kazakh and selecting works containing analytical quality indicators. The results show that the bioactive fractions of sea buckthorn (vitamin C at around 300-600 mg/100 g, carotenoids at 5–36 mg/100 g, as well as phenolic compounds) and the polyphenolic complex of grape seeds (proanthocyanidins - 50-200 mg/g in extracts, flavanols and dietary fibre) are most consistently associated in studies with a reduction in oxidation markers, more stable colour characteristics and a variable, dose-dependent effect on textural and technological indicators. The most controllable form of application for roll systems appears to be extracts, which ensure accurate dosing and uniform distribution of bioactive components. Future studies will be based on optimising the amount of plant antioxidants added and the stages of addition, heat treatment and packaging, while controlling the trade-offs between antioxidant effect and organoleptic characteristics.

Keywords: sheep meat, meat roulade, functional meat products, sea buckthorn, grape seeds, oxidative stability.

БАРАНИНА И РАСТИТЕЛЬНЫЕ АНТИОКСИДАНТЫ В ТЕХНОЛОГИИ МЯСНОГО РУЛЕТА ПОВЫШЕННОЙ ПИЩЕВОЙ ЦЕННОСТИ: СИСТЕМНЫЙ ОБЗОР

А.Е. Абдурасулова, Б.А. Рскелдиев

Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан,
e-mail: abdurasulova.aigerim@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки функциональных мясных продуктов с повышенной пищевой ценностью и одновременно устойчивой к окислительной деградации, которая в красном мясе усиливается из-за присутствия гемовых пигментов и реакционноспособных липидных фракций. Гипотеза исследования состоит в том, что сочетание баранины с биоактивными компонентами облепихи и виноградных косточек позволит сформировать биохимически обоснованную антиоксидантную платформу для мясного рулета, обеспечивающую снижение окислительных потерь и стабилизацию качества при хранении. Цель статьи — критически синтезировать современные данные о пищевой ценности и технологических особенностях баранины, а также о составе и функциональных эффектах облепихи и виноградных косточек в мясных системах. Методы включали системный обзорный анализ публикаций 2015–2025 гг. с поиском на английском, русском и казахском языках и отбором работ, содержащих аналитические показатели качества. Результаты показывают, что биоактивные фракции облепихи (витамин С порядка 300-600 мг/100 г, каротиноиды 5–36 мг/100 г, а также фенольные соединения) и полифенольный комплекс

виноградных косточек (проантоцианидины, флаванолы и пищевые волокна) в исследованиях наиболее устойчиво ассоциируются со снижением маркеров окисления, более стабильными характеристиками цвета и вариабельным, дозозависимым влиянием на текстурно-технологические показатели. Наиболее управляемой формой внесения для рулетных систем представляются экстракты, обеспечивающие точную дозировку и равномерное распределение биоактивных компонентов. Будущие исследования будут основаны на оптимизации количество вносимых растительных антиоксидантов и на этапах внесения, режима термообработки и упаковки при контроле компромиссов антиоксидантный эффект – органолептические характеристики.

Ключевые слова: баранина, мясной рулет, функциональные мясные продукты, облепиха, виноградные косточки, окислительная стабильность.

ҚОЙ ЕТІ ЖӘНЕ ӨСІМДІК ТЕКТІ АНТИОКСИДАНТТАР ЖОҒАРЫ ТАҒАМДЫҚ ҚҰНДЫЛЫҒЫ БАР ЕТ РУЛЕТІНІҢ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА: ЖҮЙЕЛІ ШОЛУ

А.Е. Абдурасулова✉, Б.А. Рскелдиев

Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,
e-mail: abdurasulova.aigerim@mail.ru

Жұмыстың өзектілігі тағамдық құндылығы жоғары және сонымен қатар тотығу деградациясына төзімді функционалды ет өнімдерін әзірлеу қажеттілігімен байланысты, өйткені қызыл ет құрамындағы гем пигменттері мен реакцияға қабілетті липидтік фракциялар тотығу үдерістерін күшейтеді. Зерттеу гипотезасы қой етін шырғанақ пен жүзім сүйектерінің биоактивті компоненттерімен біріктіру ет рулетіне арналған биохимиялық тұрғыдан негізделген антиоксиданттық платформаны қалыптастырып, тотығу шығындарын азайтуға және сақтау кезінде сапаны тұрақтандыруға мүмкіндік береді деген тұжырымға негізделеді. Мақаланың мақсаты — қой етінің тағамдық құндылығы мен технологиялық сипаттамалары, сондай-ақ облепиха мен жүзім сүйектерінің құрамы және олардың ет жүйелеріндегі функционалдық әсерлері жөніндегі заманауи деректерді сыни тұрғыдан жинақтау. Зерттеу әдістері 2015-2025 жылдар аралығындағы жарияланымдарға жүйелі шолу жүргізуді, ағылшын, орыс және қазақ тілдерінде деректер іздеуді және сапаның аналитикалық көрсеткіштері келтірілген еңбектерді іріктеуді қамтыды. Алынған нәтижелер шырғанақтың биоактивті фракциялары (С дәрумені шамамен 300-600 mg/100 g, каротиноидтар 5-36 mg/100 g, сондай-ақ фенолдық қосылыстар) және жүзім сүйектерінің полифенолдық кешені (проантоцианидиндер, флаванолдар және тағамдық талшықтар) зерттеулерде тотығу маркерлерінің төмендеуімен, түс көрсеткіштерінің неғұрлым тұрақты болуымен және құрылымдық-технологиялық сипаттамаларға дозасына тәуелді өзгермелі әсерімен ең тұрақты түрде байланысты екенін көрсетті. Рулет типті жүйелер үшін биоактивті компоненттердің дәл мөлшерленуін және біркелкі таралуын қамтамасыз ететін енгізу формасы ретінде экстрактылар ең басқарылатын нұсқа болып табылады. Болашақ зерттеулер өсімдік текті антиоксиданттардың енгізілетін мөлшерін, енгізу кезеңдерін, термиялық өңдеу мен қаптау режимдерін оңтайландыруға, сондай-ақ антиоксиданттық әсер мен органолептикалық қасиеттер арасындағы өзара ымыраны бақылауға бағытталатын болады.

Түйін сөздер: қой еті, ет рулеті, функционалды ет өнімдері, шырғанақ, жүзім сүйектері, тотығу тұрақтылығы..

Introduction. In modern meat science, the concept of functional meat products has shifted from simple fortification toward nutrient-dense, technologically stable matrices that can retain quality during processing and storage. A central scientific problem is that many of the nutrients that make meat valuable coexist with pro-oxidant drivers (heme iron, unsaturated lipids, oxygen exposure during comminution), which accelerate lipid oxidation, impair colour stability, and generate

off-flavours which ultimately shortening shelf life and reducing consumer acceptance [1].

Sheep meat is often positioned as a nutrient-dense red meat because it supplies complete proteins and a spectrum of micronutrients. In a recent lamb loin dataset, Kenenbay et al. reported iron around 2,0-2,2 mg, zinc around 3,0-3,3 mg, vitamin E around 1,0-1,4 mg, and vitamin B_{12} around 0,50–0,60 mg, illustrating the micronutrient "core" that motivates lamb-based functional products [2]. At the same time, sheep meat can be technologically vulnerable because intramuscular fat composition includes a meaningful PUFA fraction, which supplies oxidation substrates. In the same work, PUFA accounted for roughly 21,8-23,5% of total fatty acids in intramuscular fat, a range that is nutritionally attractive but chemically reactive in oxygenated, iron-rich matrices [3].

Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) is scientifically interesting for meat applications because it combines multiple antioxidant compounds. Sea buckthorn contains phenolics-radical scavenging and metal chelation, carotenoids-quenching of reactive species and contribution to colour tone, and vitamin C-redox cycling and potential support of metmyoglobin reduction depending on dose and matrix conditions. In a recent compositional synthesis, Olas et al. highlighted sea buckthorn berries as a notably vitamin-rich raw material, reporting vitamin C values that can reach approximately 275 mg/100 g, alongside lipid-soluble antioxidants such as vitamin E around 3,54 mg/100 g [4]. Mechanistically, these compounds may influence meat quality through several routes - termination of lipid peroxyl radicals by phenolic hydrogen donation, chelating Fe^{3} , lowering catalytic redox cycling that accelerates peroxide decomposition and modulating pH via organic acids [5].

Grape seeds represent a high-value secondary resource from viticulture and wine processing, aligning with circular-economy logic while offering dense polyphenolic chemistry. A recent valorisation review reported that grape by-products commonly exhibit high total phenolic content, with representative ranges for different fractions often reaching the hundreds of mg GAE/100 g, supporting their use as antioxidant carriers in foods. The dominant antioxidant "identity" of grape seed materials is typically associated with proanthocyanidins (condensed tannins) - polymeric flavanols that can suppress oxidation by radical scavenging, metal chelation, and interruption of chain propagation. Verma et al. summarised proanthocyanidins as oligopolymeric flavanol structures with broad bioactivity and technological relevance, which is directly applicable to red meat systems where oxidation is often the limiting factor for quality stability [6, 7].

Given mutton's nutrient density and red-meat bioavailability advantages, its susceptibility to oxidative and colour degradation, and the complementary antioxidant profiles of sea buckthorn and grape seeds, we hypothesise that a mutton-based meat roulade can be strengthened nutritionally while improving oxidative and quality stability through targeted inclusion of these plant resources.

According to the hypothesis, the aim of this systematic review is to map and critically synthesise contemporary evidence on lamb meat quality constraints relevant to processing and storage, sea buckthorn-derived ingredients as multifunctional antioxidant inputs, and grape seed ingredients as polyphenol-forward stabilisers and framing a biochemical rationale for their combined use in nutrient-dense lamb product development.

Materials and methods. A structured literature search for systematic review was performed in Scopus, Web of Science Core Collection, PubMed, and ScienceDirect, and the reference lists of influential papers addressing sheep meat quality, safety, and storage were additionally screened to identify other relevant studies. To strengthen regional representation, peer-reviewed articles published in Kazakhstani journals listed by the Science and Higher Education Quality Assurance Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan as recommended outlets for reporting primary scientific results were also included. The search was limited to the last 10 years.

To minimize language bias and capture locally specific evidence, searches were conducted in English, Russian, and Kazakh. The search strategy combined terms describing the raw material, the product concept, the plant additives, and outcome domains. Variants of «sheep meat» or «lamb» or «mutton» were used alone and also together with terms describing the target product («meat roulade», «rolled meat», «restructured meat product», «meat roll») and the additives («sea buckthorn» or «Hippophae rhamnoides» and «grape seed» or «grape seed extract»), along with keywords representing the outcome domains with equivalent terminology in Russian and Kazakh. Boolean logic, truncation, and platform-specific filters were adjusted to each database.

Studies were excluded if they used matrices irrelevant to meat products or did not employ a meat model system, as well as works that lacked analytical assessment of meat quality, including physicochemical, oxidative, colour, texture, microbiological, or sensory parameters. Studies that were not peer-reviewed full-text articles, such as abstracts without complete data, or that did not provide sufficient methodological detail for interpretation, were also excluded. In addition, research focused on additives unrelated to the scope of this review, that is, without a clear connection to sea buckthorn bioactives or grape-seed-derived phenolic fractions, was omitted unless such studies were cited only to provide contextual background.

Records retrieved from databases were compiled and deduplicated. Titles and abstracts were screened for relevance to ovine/red-meat systems, sea buckthorn or grape seed–derived ingredients, and quality outcomes. Full texts were then assessed against the eligibility criteria. From each included study, data were extracted on meat matrix and product type, additive form and preparation (extract, powder, pomace, oil-associated fraction), dose level and incorporation stage, and outcome measures.

Preference in interpretation was given to studies with clearly described processing conditions, validated analytical methods, and storage trials reflecting realistic shelf-life scenarios. Where findings were inconsistent, differences were interpreted in relation to matrix composition, dose, incorporation stage, and thermal/storage conditions rather than treating outcomes as directly comparable.

Results and discussion. Multiple independent studies consistently confirm that lamb is a nutrient-dense red meat, providing high-quality protein together with bioavailable micronutrients. Junkuszew et al. analysed sheep breeds and reported a dry matter range of 24,11-27,13%, which implies moisture 72,87-75,89 g/100 g. In the same muscles, intramuscular fat was 4,60-5,50 g/100 g, total protein was 19,95-22,18 g/100 g, and ash were 0,71-1,06 g/100 g, showing that lean lamb muscle is primarily a high-water, high-protein matrix with moderate intramuscular lipid [8]. At the biochemical level, lamb's protein fraction is characterised by a dense pool of essential amino acids (EAAs) that support both human nutrition and meat functionality – water binding, gelation, texture formation. Total essential amino acids of 24,17-27,20 g/100 g (dry matter) and non-essential amino acids of 35,13-39,48 g/100 g (dry matter). Among abundant contributors were glutamic acid 9,03-9,62, leucine 4,31-4,80, and lysine 3,69-4,17 g/100 g (dry matter). Such an amino acid distribution is relevant not only nutritionally but also sensorially, because glutamate-associated pathways contribute to savoury perception after proteolysis [9].

From a lipid biochemistry perspective, lamb's nutritional profile is strongly shaped by ruminant lipid metabolism (biohydrogenation and isomerisation in the rumen) and by feeding system. In lamb Longissimus dorsi, Sabbioni et al. reported PUFA 25% of total fatty acids, a PUFA/SFA ratio of 0,68, with n-3 = 8% and n-6 =14%, alongside favourable composite lipid indices- atherogenic index = 0,56-0,67 and thrombogenic index = 0,78-0,96. Biochemically, higher PUFA and n-3 fractions increase membrane fluidity and nutritional value, but also raise susceptibility to lipid peroxidation-so oxidative stability becomes a key quality dimension in lamb during storage and cooking [10].

All studies included in the tables underwent screening and were selected based on the inclusion/exclusion criteria specified in Materials and Methods.

Table 1 - Comparative chemical composition of lamb, beef and pork meat

Parameters	Mutton	Source	Beef	Source	Pork	Source
Moisture, g/100 g	68,1	[11]	72,4	[13]	74,9	[16]
Protein, g/100 g	18,5	[11]	19,1	[13]	18,2	[16]
Fat, g/100 g	12,1	[11]	12,27	[13]	12,34	[16]
Ash, g/100 g	0,99	[11]	1,2	[13]	1,07	[16]
Calcium, mg/100 g	7,27	[11]	4,39	[14]	10	[16]
Iron, mg/100 g	1,6–2,4	[11]	1,39	[14]	0,8	[16]
Potassium, mg/100 g	301	[11]	367	[14]	330	[16]
Magnesium, mg/100 g	20,8	[11]	21,3	[14]	20,4	[16]
Sodium, mg/100 g	67,5	[11]	40,4	[14]	50,1	[16]
Phosphorus, mg/100 g	193	[11]	163	[14]	220	[16]
Zinc, mg/100 g	3,08	[11]	5,28	[14]	2,4	[16]
Selenium, нg/100 g	12,3	[11]	12,5	[14]	21	[16]
Thiamine (B1), mg/100 g	0,14	[12]	0,06	[15]	0,72	[17]
Riboflavin (B2), mg/100 g	0,07	[12]	0,12	[15]	0,21	[17]
Niacin (B3), mg/100 g	3,32	[12]	2,4	[15]	4,7	[17]
Pantothenic acid (B5), mg/100 g	0,15	[12]	0,12	[15]	0,47	[17]
Pyridoxine (B6), mg/100 g	0,54	[12]	0,2	[15]	0,72	[17]
Folate (B9), mkg/100 g	4,16	[12]	5,9	[15]	5,2	[17]
Cyanocobalamin (B12), mkg/100 g	2,53	[12]	0,61	[15]	1,12	[17]
α-Tocopherol (E), mg/100 g	0,31	[12]	0,21	[15]	0,26	[17]

A consistent biochemical advantage of lamb over pork is iron density, which matters because iron in meat is largely present as heme iron (higher bioavailability than non-heme forms). Junkuszew et al. reported lamb iron 2,60-2,93 mg/100 g, while Aaslyng et al. report lean pork loin iron 1,6–2,4 mg/100 g and beef loin iron 2,40 mg/100 g. Practically, this places lamb far above pork and at least comparable to beef in total iron, supporting lamb as a strong option when dietary iron adequacy is a priority [18].

A more “technological” advantage of lamb versus pork is that its matrix naturally combines moderate intramuscular fat with a high EAA density, which supports both flavour development and a firm protein network after cooking. Intramuscular fat 4,60-5,50 g/100 g and with EAA/NEAA ratio = 0,68-0,72, a balance that helps explain why lamb can maintain sensory richness without requiring high fat levels typical of some pork products. Compared with very lean beef (2,27 g fat/100 g), lamb’s higher intramuscular lipid fraction can improve perceived juiciness and flavour intensity-while still staying within a moderate fat range [19].

Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) is biochemically unusual among edible berries because its core matrix combines high acidity, moderate sugars and very high levels of redox-active micronutrients. In a compositional survey of sea buckthorn fruits, Tkacz et al. reported total soluble solids around 3,38-5,67 g/100 g, with

glucose 1,82-3,13 g/100 g and fructose 0,90-1,71 g/100 g, while the sum of organic acids reached 0,97-2,80 g/100 g. This sugar-acid architecture explains both the characteristic sharp taste and the technological value of sea buckthorn as a naturally acidic, antioxidant-rich ingredient [20].

A key nutritional hallmark is ascorbic acid (vitamin C), which in sea buckthorn can reach physiologically meaningful levels for a realistic serving size. Bośko et al. quantified ascorbic acid at 300-600 mg/100 g of fruit, a 50-100 g portion can plausibly deliver tens to less than 100 mg vitamin C [21]. Biochemically, ascorbate acts as a two-electron reductant supporting the cellular antioxidant network, and it also serves as an enzymatic cofactor (e.g., hydroxylation reactions in connective-tissue metabolism). Importantly for a review, reported vitamin C values vary strongly with genotype and harvest conditions; Jaroszewska et al. summarize ranges where measured vitamin C spans roughly 61-159 mg/100 g, reinforcing that region must be treated as a major effect modifier [22].

Beyond vitamins, sea buckthorn is rich in polyphenols, especially flavonol derivatives, which matter because they participate in radical scavenging, metal chelation, and redox-signalling modulation. In berry extracts from multiple cultivars, Criste et al. reported total phenolics 10,12-18,66 mg GAE/g and flavonoids 6,57-9,01 mg QE/g, showing cultivar-dependent but consistently high phenolic density for an edible fruit [23]. From a human-nutrition angle, these phenolics are relevant not only as direct antioxidants, but also because many act as substrates for gut microbial metabolism, generating smaller phenolic acids that can influence inflammatory and metabolic signalling.

Sea buckthorn's carotenoid system adds a second, lipophilic antioxidant layer with provitamin-A potential. Zenkova et al. showed that total carotenoids differed sharply by variety (5,63 to 35,78 mg/100 g), and they identified zeaxanthin as a predominant compound, reaching 27,78 mg/100 g in one cultivar, lutein up to 4,74 mg/100 g and β-carotene around 0,17-1,94 mg/100 g [24]. Functionally, carotenoids are efficient physical quenchers of singlet oxygen and interceptors of lipid radicals in membranes and lipoproteins-mechanisms that complement vitamin C's aqueous redox role and help explain why sea buckthorn is repeatedly positioned as a multi-compartment antioxidant food.

In a controlled dietary intervention, Huang et al. showed that increasing sea buckthorn oil intake raised circulating trans-palmitoleic acid by 26,6%, confirming that sea buckthorn oils measurably alter circulating lipid markers in humans [25].

Sea buckthorn contributes minerals and may support metabolic outcomes through combined fiber-polyphenol-lipid mechanisms. In compositional measurements, Kim et al. reported high potassium 600,918 mg/100 g, with notable calcium 169,546 mg/100 g, magnesium 120,321 mg/100 g, phosphorus 135,445 mg/100 g, and iron 3,203 mg/100 g [26]. On the functional side, a randomized crossover trial by Ren et al. in individuals with impaired glucose regulation found that after sea buckthorn fruit puree, fasting plasma glucose changed from 6,04 to 5,80 mmol/L, and the between-condition comparison for fasting plasma glucose was significant ($p = 0,045$), suggesting a modest but detectable glycemic signal in a real dietary context [27].

In meat systems, sea buckthorn is typically introduced through two practical formats, each targeting a slightly different set of mechanisms (Table 2). First, water-compatible extracts or juices are incorporated directly into the comminuted phase during mixing, so the bioactives become distributed throughout the protein-fat matrix. Second, dry powders (extract powders or pomace powders) are added at the dry blending stage or during final mixing before stuffing or forming. This route increases the local concentration of solids and can change hydration dynamics.

Across studies, the most consistently affected outcomes are markers of oxidative stability, because sea buckthorn supplies multiple redox-active pools. In biochemical terms, lipid oxidation in meat is a chain process initiated by reactive oxygen species and catalysed by heme iron and other transition metals. It propagates through

formation of lipid radicals (L•), peroxyl radicals (LOO•) and hydroperoxides (LOOH), eventually yielding secondary aldehydes measured by TBARS. Sea buckthorn phenolics can donate electrons or hydrogen atoms to terminate LOO• radicals (chain-breaking antioxidant action), while also chelating Fe^{2} /Fe^{3} , reducing Fenton-type initiation. At the same time, carotenoids can quench singlet oxygen and intercept radicals in lipid regions, and ascorbate can regenerate oxidized antioxidant forms-although its role is dose-and matrix-dependent because in the presence of free iron, strong reducers can sometimes show pro-oxidant behaviour. Practically, this is why sea buckthorn additions frequently translate into lower TBARS, POV, AV and improved colour stability in chilled storage, especially in systems with higher fat or higher heme pigment load.

Table 2 - Application of sea buckthorn and its effects in meat systems

Meat or product type	Sea buckthorn form	Dose and incorporation stage	Results	Source
Horse meat, chunked delicacy “Jaya”	Dry sea buckthorn extract (powder)	3% (w/w), mixed into formulation prior to processing	TBARS reduced by 26,5–44,7%, remaining 0,26–0,49 mg MDA/kg; AV 0,28–0,59 mg KOH/g; POV 0,11–0,55 meq O_2/kg; hardness decreased 1,41–1,33;	[28]
Cooked-smoked sausages	Sea buckthorn extract (with hemp protein as co-ingredient)	0,005% – 0,015% added during batter formulation before stuffing	Best sensory acceptance reported at 0,01%. Total microbial counts within acceptable limits up to 36 days, supporting shelf life under 0–4 °C	[29]
Pork sausages	Sea buckthorn extract	3 mL/kg and 5 mL/kg, incorporated during mixing	pH: 6,55(control) and 6,18 (5 mL/kg); colour day: L* 67,91 (control), 66,54 (3 mL/kg) and 66,28 (5 mL/kg); Firmness: 385,96 N (control), 371,77 N (3 mL/kg) and 407,99 N (5 mL/kg);	[30]
Beef burgers	Sea buckthorn berry juice	Juice incorporated at the patty formulation stage (before cooking)	Cooking loss decreased from 41,2% (control) to 38,9%. Yield increased from 58,8% to 62,0%. Antioxidant activity in burgers reported in the range 42–440 µmol/L/100 g.	[31]
Chilled beef under super-chilled storage	Sea buckthorn pomace extract	SBP extract 0% / 1% / 2% / 3% (w/w)	Shelf life prolonged from 25 to 35 days with 3% extract film. Higher L* and a* maintained.	[32]
Pork sausages	Sea buckthorn extract	Extract used at 3 mL/kg and 5 mL/kg (incorporation into sausage system)	Extract characterised by TPC 677,58 g GAE/kg and DPPH inhibition 65,04%. Authors report reduced malondialdehyde (MDA) formation in sausages (oxidation), while antimicrobial impact was not evident	[33]

Grape seeds (*Vitis vinifera L.)* are nutritionally meaningful mainly because they concentrate dietary fibre and plant secondary metabolites. In a compositional study of defatted grape seed meal,

Baca-Bocanegra *et al.* reported moisture 11,78%, ash 2,87%, dietary fibre 22,86%, protein 10,76%, lipid 1,30%, and available carbohydrates 50,43%. This profile is typical of an ingredient where nutritional value is not driven by fat or simple sugars, but by fibre-associated physiological effects and by co-localised phenolics bound to the cell-wall matrix [34].

Table 3 - Application of grape seed and its effects in meat systems

Meat or product type	Form of grape seed ingredient	Dose and incorporation method	Results	Source
Pig liver pâté, heat-treated,	Grape seed extract	50 / 200 / 1000 mg/kg, incorporated into the meat batter during mixing	Baseline TBARS 0,4–3,3 mg MDA/kg; higher extract level resulted in lower oxidative deterioration.	[38]
Dry-cured pork sausage (“chorizo”)	Grape seed extract	Extract dose range - 0,05–1,0 g/kg; incorporated during vacuum mincing	TBARS 0,4 mg MDA/kg; hardness decreased, with minimum values reported at 0,20 g/kg. TVC in extract-treated batches up to 7,88–7,97 log CFU/g.	[39]
Ground beef, retail display storage	Grape seed extract	250 mg/kg, added during minced meat mixing	TBARS (control) - 0,96 mg MDA/kg on day 6; with extract - 0,82 mg MDA/kg on day 6.	[40]
Meat patties (85% beef + 15% pork fat)	Grape seed extract	0,10 / 0,25 / 0,50 / 0,75 g/kg; extract pre-dissolved in water and incorporated during mixing before patty forming	Colour on day 10 a* = 8,62 (control) and 13,20 (0,75 g/kg). TBARS maintained within 0–0,51 mg MDA/kg.	[41]
Dry-cured pork neck, long-term storage	Grape seed extract	Dose variants GSE-1 / GSE-2 / GSE-5. Incorporated into the meat mass at the beginning of processing	After 2 months TBARS 0,72 mg MDA/kg (control) and 0,42 mg MDA/kg (GSE-5), ascorbic acid - 0,53 mg MDA/kg.	[42]
Beef–pork sausage model system	Grape seed extract	0,125 / 0,25 g per 250 g meat batter added during mixing. Some treatments combined with ascorbic acid	TBARS shows 0,43 mg MDA/kg (GSE 0,125 g/250 g), 0,41 mg MDA/kg (GSE + AA); and 0,45 mg MDA/kg (control).	[43]
Smoked pork sausage	Grape seed extract	Extract incorporated during mixing	Reported reductions TBARS by 30,3%, expressible water by 26,4%. Sensory score higher by 18,0%; TVC moulds also decreased.	[44]

The lipid fraction of grape seeds is also biochemically relevant when the oil is recovered. Carmona-Jiménez *et al.* quantified grape seed oil yields of 12,46-22,52 g oil/100 g dry seed and showed that the oil is strongly skewed toward unsaturated fatty acids (USFA 82-84%), with PUFA 64,04-69,44% and MUFA 16,43-20,27%. Linoleic acid dominated at 65,55-69,00%, while oleic acid ranged up to about 20,13%. In the same research line, grape seed oils were

reported to contain total tocopherols 196,2-248,0 mg/kg oil, supporting Vitamin-E-linked antioxidant functionality of the lipid phase [35]. Ivanov *et al.* measured high concentrations in grape seed-derived ingredients, reporting total phenolic content 111,22 mg GAE/g, total flavonoids 51,50 mg QE/g, and total proanthocyanidins 170,45 mg CE/g [36]. These compounds are rich in pyrogallol hydroxyl groups, which enables radical scavenging via electron transfer, and metal chelation, which can slow Fenton-type propagation of oxidation in biological and food systems.

Human evidence (mostly from grape seed extracts) suggests measurable effects on vascular and redox endpoints. In a meta-analysis of randomised controlled trials, Foshati *et al.* found that grape seed extract supplementation reduced diastolic blood pressure by 2,20 mmHg and heart rate by 1,25 bpm, and increased flow-mediated dilation by 1,02%, while the pooled reduction in systolic blood pressure (3,55 mmHg) was not statistically significant [37]. Mechanistically, these outcomes align with polyphenol-driven modulation of endothelial nitric oxide bioavailability, reduced oxidative quenching of NO, and attenuation of low-grade inflammation.

In meat systems, grape seed ingredients are most often introduced as grape seed extract during the mixing stage, so the phenolic fraction becomes uniformly distributed within the protein-fat matrix before forming and subsequent processing (Table 3). Across product types, the most reproducible impact is on oxidative stability, typically tracked by TBARS. Mechanistically, this aligns with the chemistry of grape seed polyphenols which can quench lipid peroxyl radicals (LOO•) as chain-breaking antioxidants and chelate transition metals, thereby reducing initiation and propagation of lipid peroxidation driven by heme iron and non-heme catalysts. The numeric signals in the table are consistent with that model. Even when results are reported as relative changes, Zhou et al. still observed a 30,3% TBARS reduction, which is the same direction expected from phenolic-driven suppression of lipid oxidation [44].

Because lipid oxidation and pigment oxidation are coupled, grape seed additives also frequently affect colour stability and premature browning behaviour. Xin et al. reported that redness on the raw surface at day 10 increased from 8,62 (control) to 13,20 at 0,75 g/kg, while TBARS stayed within 0-0,51 mg MDA/kg-a pattern consistent with lowering oxidative pressure on myoglobin and slowing conversion toward metmyoglobin (brown), particularly at the oxygen-exposed surface [41]. In parallel, texture and water-binding outcomes can shift because polyphenols can interact with myofibrillar proteins, potentially altering protein-protein aggregation and water immobilisation during drying or heating. That helps explain why Zhou et al. saw reduced expressible water by 26,4% alongside improved sensory scores [44].

Conclusion. Analysis of the literature allows us to construct a convincing scientific rationale for the selection of raw materials and functional components. Lamb, as a meat ingredient for roulade, is particularly vulnerable to lipid and pigment oxidation due to the release of heme catalysts. In this context, sea buckthorn and grape seeds form a complementary antioxidant platform: sea buckthorn combines phenolic compounds, ascorbic acid, carotenoids and organic acids, potentially affecting the redox balance and colour stability, while grape seeds provide ‘polyphenolic support’ (proanthocyanidins) capable of breaking peroxide oxidation chains and binding transition metal ions, inhibiting the decomposition of hydroperoxides and the accumulation of secondary oxidation products. A comparison of studies shows that the most controllable and reproducible method of introducing both additives is in extract form, as it ensures accurate dosing, uniform distribution of bioactive substances in the protein-fat system, and minimises the risk of undesirable effects of dispersed particles on the cut and texture of roll products.

Based on this, subsequent studies are expected to show a decrease in oxidative degradation markers, more stable colour parameters and a reduction in the formation of rancid aroma tones during storage, as well as the preservation of technological suitability due to a reduction in losses during heat treatment

and textural characteristics. Subsequent studies should focus on optimising extract doses and key technological conditions with mandatory control of the trade-offs between antioxidant effect and organoleptic indicators. This approach will allow us to quantitatively substantiate the functional viability of the lamb and plant antioxidants composition and develop a reproducible technological scheme for meat rolls with high nutritional value.

References

1. Uzakov Y. et al. Collagen Hydrolysate-Cranberry Mixture as a Functional Additive in Sausages //Processes. -2025. Vol.13(10):3233. DOI 10.3390/pr13103233.

2. Kenenbay G. Et al. Marbling and Meat Quality of Kazakh Finewool Purebred and Suffolk× Finewool Crossbred Sheep on an Intensive Fattening Diet//Processes. -2025.-Vol.13(9):2874. DOI 10.3390/pr13092874.

3. Ding W. et al. Meat of sheep: insights into mutton evaluation, nutritive value, influential factors, and interventions //Agriculture. -2024. Vol.14. (7):1060. DOI 10.3390/agriculture14071060.

4. Olas B. Sea buckthorn as a source of important bioactive compounds in cardiovascular diseases //Food and Chemical Toxicology. -2016.-Vol.97.-P.199-204. DOI 10.1016/j.fct.2016.09.008.

5. Gâtlan A. M., Gutt G. Sea buckthorn in plant based diets. An analytical approach of sea buckthorn fruits composition: Nutritional value, applications, and health benefits //environmental research and public health. -2021.-Vol.18(17):8986. DOI 10.3390/ijerph18178986.

6. Bhutani M. et al. Valorization of Grape By-Products: Insights into Sustainable Industrial and Nutraceutical Applications//Future Foods. -2025.-P.1-20. DOI 10.1016/j.fufo.2025.100710.

7. Verma P. et al. Structural chemistry to therapeutic functionality: A comprehensive review on proanthocyanidins //Biocatalysis and Agricultural Biotechnology.-2023.-Vol.5:102963.DOI 10.1016/j.bcab.2023.102963.

8. Junkuszew A. et al. Chemical composition and fatty acid content in lamb and adult sheep meat //Archives Animal Breeding. -2020. Vol.63(2). -P.261-268. DOI 10.5194/aab-63-261-2020.

9. Suliman G. M. et al. A comparative study of sheep breeds: fattening performance, carcass characteristics, meat chemical composition and quality attributes //Frontiers in veterinary science. -2021.-Vol.8:647192. DOI 10.3389/fvets.2021.647192.

10. Sabbioni A. et al. Allometric coefficients for physical-chemical parameters of meat in local sheep breed //Small ruminant research. -2019. Vol.174.-P.141-147. DOI 10.1016/j.smallrumres.2019.04.001.

11. Gama K. V. M. F. et al. Fatty acid, chemical, and tissue composition of meat comparing Santa Inês breed sheep and Boer crossbreed goats submitted to different supplementation strategies //Tropical animal health and production. -2019.-Vol.52(2). -P.601-610. DOI 10.1007/s11250-019-02047-1.

12. Erasmus S. W., Muller M., Hoffman L. C. Authentic sheep meat in the European Union: Factors influencing and validating its unique meat quality// Science of Food and Agriculture. -2017. -Vol.97(7). -P.1979-1996. DOI 10.1002/jsfa.8180.

13. Geletu U. S. et al. Quality of cattle meat and its compositional constituents //Veterinary medicine international. -2021.-Vol.2021(1). DOI 10.1155/2021/7340495.

14. Picard B., Gagaoua M. Muscle fiber properties in cattle and their relationships with meat qualities: An overview//Journal of Agricultural and Food Chemistry. -2020.-Vol.68(22). -P.6021–6039. DOI 10.1021/acs.jafc.0c02086.

15. Venkata Reddy B. et al. Beef quality traits of heifer in comparison with steer, bull and cow at various feeding environments//Animal Sci J.- 2015. -Vol.86(1). -P.1-16. DOI 10.1111/asj.12266.

16. Vicente F., Pereira P. C. Pork meat composition and health: A review of the evidence//Foods. -2024.-Vol.13(12): 1905. DOI 10.3390/foods13121905.

17. Škrlep M. et al. The use of pork from entire male and immunocastrated pigs for meat products-An overview with recommendations//Animals. -2020.-Vol.10(10):1754. DOI 10.3390/ani10101754

18. Aaslyng M. D., Meinert L. Meat flavour in pork and beef–From animal to meal//Meat science. -2017.-Vol.132.-P.112-117. DOI 10.1016/j.meatsci.2017.04.012.

19. Liao J. et al. New insights into the effects of dietary amino acid composition on meat quality in pigs: A review//Meat science.-2025.-Vol.221:109721. DOI 10.1016/j.meatsci.2024.109721.

20. Tkacz K. et al. Anti-oxidant and anti-enzymatic activities of sea buckthorn (Hippophaë rhamnoides L.) fruits modulated by chemical components//Antioxidants.-2019.-Vol.8(12):618. DOI 10.3390/antiox8120618.

21. Bośko P. et al. Chemical composition and nutritive value of sea buckthorn leaves//Molecules. -2024.Vol.29(15): 3550. DOI 10.3390/molecules29153550.

22. Jaroszewska A., Biel W., Gibczyńska M. Analysis of the content of macro-and microelements in the leaves of sea buckthorn (Hippophaë rhamnoides L.). -2017.-Vol.338(44).-P.61-88. DOI 10.21005/AAPZ2017.44.4.07.

23. Criste A. et al. Phytochemical composition and biological activity of berries and leaves from four Romanian sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) varieties //Molecules. -2020. Vol.25(5):1170. DOI 10.3390/molecules25051170.

24. Zenkova M., Pinchykova J. Chemical composition of Sea-buckthorn and Highbush Blueberry fruits grown in the Republic of Belarus //Food Science and Applied Biotechnology. -2019. Vol.2(2). -P.121-129. DOI 10.30721/fsab2019.v2.i2.59.

25. Huang N. K. et al. Supplementation with Seabuckthorn Oil Augmented in 16: 1n–7tIncreases SerumTrans-Palmitoleic Acid in Metabolically Healthy Adults: A Randomized Crossover Dose-Escalation Study//The Journal of Nutrition. -2020.-Vol.150(6). -P.1388-1396. DOI 10.1093/jn/nxaa060.

26. Kim D. S., Iida F. Texture characteristics of sea buckthorn (Hippophae rhamnoides) jelly for the elderly based on the gelling agent//Foods.-2022.Vol.11(13):1892. DOI 10.3390/foods11131892.

27. Ren Z. et al. Effect of sea buckthorn on plasma glucose in individuals with impaired glucose regulation: a two-stage randomized crossover intervention study //Foods. -2021. Vol.10(4):804. DOI 10.3390/foods10040804.

28. Alimardanova M. K. et al. Effect of Hippophae rhamnoides Extract Addition on the Quality and Safety of Traditional Kazakh Chunked Delicacy “Jaya”//Foods. -2025. Vol.14(21):3698. DOI 10.3390/foods14213698.

29. Bukarbayev K. et al. Effect of hemp protein and sea buckthorn extract on quality and shelf life of cooked-smoked sausages//Foods. -2025. Vol.14(15):2730. DOI 10.3390/foods14152730.

30. Bobko M. Et al. Sensory properties of pork sausage after sea buckthorn extract addition //Czech Journal of Food Sciences. -2025. Vol.43(5).-P.320-325. DOI 10.17221/11/2025-CJFS.

31. Wojtaszek A. et al. Physicochemical, Antioxidant, Organoleptic, and Anti-Diabetic Properties of Innovative Beef Burgers Enriched with Juices of Açaí (Euterpe oleracea Mart.) and Sea Buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) Berries //Foods. -2024.-Vol.13(19):3209. DOI 10.3390/foods13193209.

32. Guo Z. et al. Changes in chilled beef packaged in starch film containing sea buckthorn pomace extract and quality changes in the film during super-chilled storage //Meat Science. - 2021. Vol.182: 108620. DOI 10.1016/j.meatsci.2021.108620.

33. Mesárošová A. et al. Effect of sea buckthorn (Hippophae rhamnoides var. vitaminnaja) extract on spoilage of pork sausages//Journal of microbiology, biotechnology and food sciences. -2024. -Vol.13(4): e10420. DOI 10.55251/jmbfs.10420.

34. Baca-Bocanegra B. et al. Optimization of protein extraction of oenological interest from grape seed meal using design of experiments and response surface methodology//Foods. -2021. -Vol.10(1):79. DOI 10.3390/foods10010079.

35. Carmona-Jiménez Y. et al. Fatty acid and tocopherol composition of pomace and seed oil from five grape varieties southern Spain//Molecules. -2022.-Vol.27(20):6980.DOI 10.3390/molecules27206980.

36. Ivanov Y., Atanasova M., Godjevargova T. Nutritional and Functional Values of Grape Seed Flour and Extract for Production of Antioxidative Dietary Supplements and Functional Foods//Molecules. - 2025. Vol.30(9):2029. DOI10.3390/molecules30092029.

37. Foshati S. et al. The effect of grape (Vitis vinifera) seed extract supplementation on flow-mediated dilation, blood pressure, and heart rate: A systematic review and meta-analysis of controlled trials with duration-and dose-response analysis //Pharmacological research. -2022. Vol.175:105905. DOI 10.1016/j.phrs.2021.105905.

38. Pateiro M. et al. Oxidation stability of pig liver pâté with increasing levels of natural antioxidants (grape and tea)//Antioxidants. -2015. Vol.4(1). -P.102-123. DOI 10.3390/antiox4010102.

39. Pateiro M. et al. Effect of addition of natural antioxidants on the shelf-life of “Chorizo”, a Spanish dry-cured sausage//Antioxidants. -2015. Vol.4(1). -P.42-67. DOI 10.3390/antiox4010042.

40. Gómez I. et al. Shelf life of ground beef enriched with omega-3 and/or conjugated linoleic acid and use of grape seed extract to inhibit lipid oxidation //Food Science & Nutrition. -2016. Vol.4(1). -P.67-79. DOI 10.1002/fsn3.251.

41. Xin L. U. O. et al. Effects of grape seed extract on meat color and premature browning of meat patties in high-oxygen packaging //Journal of Integrative Agriculture. -2022.-Vol.21(8).-P.2445-2455. DOI 10.1016/S2095-3119(21)63854-6.

42. Libera J. et al. Use of grape seed extract as a natural antioxidant additive in dry-cured pork neck technology//Biotechnology and Food Science. -2018. Vol.82(2).-P.141-150. DOI 10.34658/bfs.2018.82.2.141-150.

43. Ivanov Y. et al. The Effect of Grape Seed Extract on Lipid Oxidation, Color Change, and Microbial Growth in a Beef–Pork Sausage Model System //Molecules. -2025.-Vol.30(8):1739. DOI 10.3390/molecules30081739.

44. Zhou Y., Wang Q. Y., Wang S. Effects of rosemary extract, grape seed extract and green tea polyphenol on the formation of N-nitrosamines and quality of western-style smoked sausage //Journal of Food Processing and Preservation.-2020.-Vol.44(6):e14459.DOI 10.1111/jfpp.14459.

Information about the authors

Abdurasulova A.E. - PhD student, Master of Technical Sciences, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: abdurasulova.aigerim@mail.ru;

Rskeldiyev B.A. - Doctor of Technical Sciences, Professor, Almaty Technological University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: berdan_r@mail.ru.

Сведения об авторах

Абдурасулова А.Е. - магистр, докторант, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан, e-mail: abdurasulova.aigerim@mail.ru;

Рскелдиев Б.А. - д.т.н., профессор, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан, Алматы, e-mail: berdan_r@mail.ru.

МРНТИ 65.43.29 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1360**

ОТАНДЫҚ СЕЛЕКЦИЯЛЫ БИДАЙ ДӘНІНЕН СЫРАЛЫҚ УЫТ ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН УЫТ ӨСІРУ РЕЖИМДЕРІН ТАҢДАУ

[1]Д.Н. Бакытжан✉, [2]Э.Б. Аскарбеков, [3]И.В. Новикова, [1]А.К. Кекибаева, [1]Г.И. Байгазиева

[1]Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,
[2]Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
[3]Воронеж мемлекеттік инженерлік технологиялар университеті, Воронеж, Ресей

✉ *Корреспондент-автор: didar_99_kz@mail.ru*

Мақалада Қазақстан Республикасының отандық селекциясымен шығарылған бидай сорттарынан бидай уытын өндірудің теориялық және эксперименттік аспектілері қарастырылып, оны сыра қайнату саласында қолданудың мақсатқа сәйкестігі негізделді. Зерттеудің өзектілігі жергілікті дәнді дақыл шикізатын пайдалану арқылы сыра қайнатудың шикізат базасын кеңейту және импорттық уытқа тәуелділікті төмендету қажеттілігімен айқындалады. Зерттеу нысандары ретінде дәннің физика-химиялық және технологиялық сипаттамалары бойынша ерекшеленетін қазақстандық селекциялы жұмсақ бидай сорттары - Матай, Ертіс және Тәуелсіздік таңдап алынды. Жұмыста ғылыми-техникалық және нормативтік әдебиеттерді талдау әдістері, сонымен қатар дән мен уыттың сапасын бағалаудың жалпы қабылданған физика-химиялық, биохимиялық және технологиялық әдістері қолданылды. Эксперименттік бөлім бидайды уыт өсірудің әртүрлі температуралық-уақыттық режимдерін таңдау мен салыстыруды, ылғал жинақталуының динамикасын, азотты заттар мөлшерінің және бос аминді азоттың өзгерісін бақылауды қамтыды. Зерттелген бидай сорттарының барлығы қанағаттанарлық физиологиялық белсенділікке ие екені анықталды және оларды уыт өндірісі үшін шикізат ретінде қарастыруға болады. Бидай уытын алу үшін ең қолайлы Тәуелсіздік сорты болып шықты, ол ақуыз мөлшерінің және дәннің шынылығының орташа деңгейімен сипатталады. Уыт өсіру температурасы ақуыздық гидролиздің қарқындылығына және ашытқылар үшін уыттың қоректік құндылығын айқындайтын еркін аминді азоттың жиналуына елеулі әсер ететіні көрсетілді. Алынған нәтижелер технологиялық көрсеткіштері сыра қайнату саласының талаптарына сәйкес келетін бидай уытын өндіру мүмкіндігін растайды және отандық шикізат негізінде бидай сырасын өндіру технологияларын әзірлеуде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: сыра қайнату, сыралық уыт, технология, бидай, уыт өсіру, аминді азот.

ПОДБОР РЕЖИМОВ СОЛОДОРАЩЕНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПИВОВАРЕННОГО СОЛОДА ИЗ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ

[1]Д. Бакытжан✉, [2]Э.Б. Аскарбеков, [3]И.В. Новикова, [1]А.К. Кекибаева, [1]Г.И. Байгазиева

[1]Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан,
[2]Казахский университет технологии и бизнеса им.Кулажанова К.С., Астана, Казахстан,
[3]Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия,
e-mail: didar_99_kz@mail.ru

В статье рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты производства пшеничного солода из сортов пшеницы отечественной селекции Республики Казахстан и обоснована целесообразность его применения в пивоваренной отрасли. Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширения сырьевой базы пивоварения за счёт использования местного зернового сырья и снижения зависимости от импортного солода. В качестве объектов исследования выбраны сорта мягкой пшеницы казахстанской селекции: Матай, Ертіс и Тәуелсіздік, различающиеся по физико-химическим и технологическим характеристикам зерна. В работе применены методы анализа научно-технической и нормативной литературы, а также общепринятые физико-химические, биохимические и технологические методы оценки качества зерна и солода. Экспериментальная

часть включала подбор и сравнение различных температурно-временных режимов солодоращения пшеницы с контролем динамики влагонакопления, изменения содержания азотистых веществ и свободного аминного азота. Установлено, что все исследуемые сорта пшеницы обладают удовлетворительной физиологической активностью и могут рассматриваться в качестве сырья для солодовенного производства. Наиболее перспективным для получения пшеничного солода оказался сорт Тәуелсіздік, характеризующийся умеренным содержанием белка и стекловидности. Показано, что температура солодоращения оказывает существенное влияние на интенсивность белкового гидролиза и накопление свободного аминного азота, определяющего питательную ценность солода для дрожжей. Полученные результаты подтверждают возможность получения пшеничного солода с технологическими показателями, соответствующими требованиям пивоваренной отрасли, и могут быть использованы при разработке технологий производства пшеничного пива на основе отечественного сырья.

Ключевые слова: пивоварение, солод, технология, пшеница, солодоращение, аминный азот.

SELECTION OF MALTING REGIMES FOR THE PRODUCTION OF BREWING MALT FROM WHEAT GRAIN OF DOMESTIC BREEDING

[1]D. Bakytzhan✉, [2]E.B. Askarbekov, [3]I.V. Novikova, [1]A.K. Kekibayeva, [1]G.I. Baigazieva

[1]Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan,
[2]K.S. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana Kazakhstan,
[3]Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia,
e-mail: didar_99_kz@mail.ru

The article examines the theoretical and experimental aspects of wheat malt production from wheat varieties of domestic breeding of the Republic of Kazakhstan and substantiates the feasibility of its application in the brewing industry. The relevance of the study is обусловлена the need to expand the raw material base of brewing through the use of local grain resources and to reduce dependence on imported malt. The objects of the study were soft wheat varieties of Kazakh Breeding-Matai, Ertis, and Tauelsizdik-which differ in their physicochemical and technological grain characteristics. The research employed methods of analysis of scientific, technical, and regulatory literature, as well as generally accepted physicochemical, biochemical, and technological methods for assessing the quality of grain and malt. The experimental part included the selection and comparison of various temperature-time malting regimes for wheat, with monitoring of moisture uptake dynamics, changes in nitrogenous substances, and free amino nitrogen content. It was established that all the studied wheat varieties exhibit satisfactory physiological activity and can be considered as raw materials for malting production. The Tauelsizdik variety proved to be the most promising for wheat malt production, being characterized by moderate protein content and vitreousness. It was shown that malting temperature has a significant effect on the intensity of protein hydrolysis and the accumulation of free amino nitrogen, which determines the nutritional value of malt for yeast. The obtained results confirm the possibility of producing wheat malt with technological indicators meeting the requirements of the brewing industry and can be used in the development of technologies for wheat beer production based on domestic raw materials.

Keywords: brewing, malt, technology, wheat, malting, free amino nitrogen (FAN).

Кіріспе. Сыра қайнату - тағам өнеркәсібінің ең көне, әрі технологиялық тұрғыдан күрделі салаларының бірі. Бұл саланың негізінде ашытылатын қанттардың, ферменттердің және дәмдік-хош иістік қосылыстардың негізгі көзі ретінде уытты пайдалану жатыр [1,2]. Арпа уытымен қатар, бидай уыты да сыраның кең ассортиментін өндіруде, әсіресе өзіндік органолептикалық сипаттамаларымен ерекшеленетін жоғары ашытылатын сорттарды дайындауда маңызды рөл атқарады [3].

Бидай уыты бидай дәнін бақыланатын жағдайда өсіру және кейіннен кептіру арқылы алынады, соның нәтижесінде ферменттік жүйелер, ең алдымен амилазалар мен протеазалар белсенденеді [4]. Бұл ферменттер уытты ысқылау процесінде дәннің крахмалы мен ақуызды заттарының гидролизін қамтамасыз етіп, суслоның құрамын қалыптастырады және дайын сыраның сапасын айқындайды. Арпадан айырмашылығы, бидай қауыссыз дән, бұл өңдеудің технологиялық параметрлеріне, затордың сүзілгіштік қасиеттеріне және сусынның құрылымына әсер етеді [5].

Сыра қайнатуда бидай уытын қолдану жұмсақ дәмнің қалыптасуына, көбіктің жоғары түзілу қабілетіне және бидай сырасына тән ерекше лайлылықтың пайда болуына ықпал етеді [6]. Бидайдағы ақуыздар мен ерігіш азотты заттардың мөлшерінің жоғары болуы көбіктің тұрақтылығына оң әсер етеді, алайда уыттандыру және уытты езгілеу режимдерін неғұрлым дәл бақылауды талап етеді [7].

Қазақстан айтарлықтай аграрлық әлеуетке ие мемлекет және Еуразия өңіріндегі ірі бидай өндірушілердің бірі болып табылады [8]. Елдің климаттық жағдайлары мен топырақ-климаттық аймақтарының алуан түрлілігі крахмал мөлшері жоғары, шынылығы оңтайлы және ақуыз көрсеткіштері қанағаттанарлық бидай сорттарын өсіруге мүмкіндік береді, бұл оларды уыт және сыра өндірісі үшін перспективалы шикізатқа айналдырады. Алайда дәстүрлі түрде Қазақстандық селекциялы бидай негізінен нан пісіру және экспорт салаларына бағдарланған, ал оны сыра қайнатуда қолдану мәселесі әлі де жеткілікті деңгейде зерттелмеген [9].

Отандық бидай сорттарынан бидай уытын өндірудің экономикалық және технологиялық маңызы зор. Жергілікті шикізатты пайдалану сыра қайнату өнеркәсібінің импорттық уытқа тәуелділігін төмендетуге, тасымалдау шығындарын қысқартуға және жеткізілімдердің тұрақтылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, уыттандыру режимдерін қазақстандық бидай сорттарының биохимиялық ерекшеліктеріне бейімдеу алдын ала белгіленген технологиялық қасиеттері бар уыт әзірлеуге жол ашады.

Ғылыми тұрғыдан алғанда, қазақстандық бидай сорттарының уыттық қасиеттерін зерттеу сыра қайнатудың шикізат базасын кеңейту және дәнді өңдеу технологияларын жетілдіру үшін қызығушылық тудырады. Ферментативтік белсенділікті, экстрактивтілікті, ақуыздардың ерігіштігін және бидай уыты сапасының өзге де көрсеткіштерін зерделеу оны сыраның әртүрлі рецептураларында қолданудың мақсатқа сәйкестігін негіздеуге мүмкіндік береді [3].

Осыған байланысты, Қазақстанда өсірілетін бидай сорттарынан бидай уытын өндіруді дамыту - сыра қайнату саласының инновациялық дамуына ықпал ететін, аграрлық ресурстарды ұтымды пайдалануды қамтамасыз ететін және отандық өнімнің ішкі әрі сыртқы нарықтардағы бәсекеге қабілеттілігін арттыратын перспективалы бағыт болып табылады [10].

Ұсынылып отырған зерттеудің мақсаты - отандық селекциялы бидай сорттарынан сыра қайнатуға қолайлы бидай уытын өндірудің сәйкестігін негіздеу.

Қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін зерттеуде мынадай міндеттерді шешу көзделеді: уыт өндірісі үшін маңызды қазақстандық селекциялы бидай дәнінің биохимиялық және технологиялық ерекшеліктерін зерттеу; уыт өндіруде теориялық негіздерін және процестердің бидай уытының ферментативтік белсенділігіне әсерін талдау.

Зерттеу гипотезасы Қазақстанда өсірілетін бидай сорттары уыт өсіру режимдерін оңтайландыру жағдайында сыра қайнату өнеркәсібінің талаптарына сай жеткілікті ферментативтік белсенділігі бар бидай уытын алуды қамтамасыз ете алады және бидай сырасының түрлерін өндіруде тиімді пайдаланылуы мүмкін деген болжамға негізделеді.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу нысандары ретінде отандық селекциялы бидай сорттары алынды: №1 үлгі -Матай, №2 үлгі - Ертіс, №3 үлгі - Тәуелсіздік, сондай-ақ сыра қайнатуға арналған бидай уытын өндіру үдерісінің өзі қа-

растырылды. Бидай сорттары «Қазақ егіншілік және өсімдік шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты» ЖШС-нен (Алматы облысы, Қазақстан) алынды. Ғылыми зерттеулер Алматы технологиялық университетінің «Тағам қауіпсіздігі» ғылыми-зерттеу институтында, сонымен қатар ФГБОУ ВО ВГУИТ (РФ, Воронеж қаласы) сынақ орталығында жүргізілді.

Жұмыста келесі зерттеу әдістері қолданылды: уыт өсіру және сыра қайнату бойынша ғылыми-техникалық әрі нормативтік әдебиеттерді талдау және жалпылау; дән мен уыт сапасының физика-химиялық көрсеткіштерін, сондай-ақ дәннің уыттық көрсеткіштерін анықтаудың жалпы қабылданған әдістері.

Бидай дәнінің өнгіштік қабілетін анықтау МЕМСТ 10968-88 стандарты бойынша жүргізілді. Әдіс қатаң белгіленген температуралық жағдайларда ылғалды ортада дән өлшендісін өндіруге негізделеді, кейін қалыпты өскін түзген дәндердің саны есептеледі. Ол үшін орташа сынамадан зақымданған және толық дамымаған дәндерсіз таза сынама бөлініп алынады. Дәндер сүзгі қағазына немесе Петри табақшаларына орналастырылады. Қағаз дистилденген сумен біркелкі ылғалдандырылады. Сынамалар 20 ± 2°С температурада термостатқа қойылып, өндіру ұзақтығы 5-7 тәулік жүргізіледі. Қалыпты өскін берген дәндердің саны есептеліп, көрсеткіш формула бойынша есептеледі.

Дәннің тіршілікке қабілеттілігін анықтау МЕМСТ 10968-88 стандарты бойынша жүргізілді. Әдіс физиологиялық тыныштық күйінде болатын дәндерді қоса алғанда, зат алмасу үдерістеріне қабілетті тірі дәндерді анықтауға негізделген. Дәндер 18–22°С температурадағы суға 24 сағат жібітіледі. Жібіткеннен кейін жеделдетілген өндіру жүргізіледі немесе ұрықты бояу әдісі қолданылады. Ұрықтың тіршілік белсенділігі белгілері бар тірі дәндердің саны есептеледі.

Нәтижелер және талқылау. «Матай» бидай сорты Қазақстанның оңтүстік-шығыс өңірінің табиғи-климаттық жағдайларын ескере отырып шығарылған жұмсақ бидайдың қазақстандық сорттарына жатады. Сорт атауы Матай өңірімен байланысты, бұл оның ылғалдануы тұрақсыз тау бөктері және дала аймақтарына бейімделгенін көрсетеді.

Сорт орташа мерзімде пісіп-жетілуімен және өңірдің топырақ-климаттық жағдайларына жақсы бейімделгіштігімен сипатталады. Дәні жеткілікті дәрежеде біркелкі қалыптасады, шыныылығы қанағаттанарлық және ұнтақтауға қолайлы қасиеттерімен ерекшеленеді.

«Матай» ең алдымен нан пісіру мақсатында пайдалануға бағытталған және тұрақты технологиялық сипаттамалары бар ұн алуды қамтамасыз етеді. Сорт өңірлік егіншілікте кеңінен қолданылады және өнімнің тұрақтылығымен бағаланады. Бұл сортты сыра қайнату саласында қолдану ерекше қызығушылық тудырады [11].

«Ертіс» сорты Қазақстанның солтүстік және солтүстік-шығыс өңірлеріне арналған жұмсақ бидай сорттарына жатады. Атауы Ертіс өзенімен байланысты, бұл оның климаты салқындау аймақтарда аудандастырылғанын көрсетеді.

Сорт интенсивті даму типімен және тығыз, толық толысқан дән түзуімен ерекшеленеді. Ақуыз мөлшерінің жоғары болуы және желімшенің сапасының жақсы болуына байланысты «Ертіс» дәні күшті бидайлар санатына жатады. Бұл ерекшелік одан сыра қайнатуға арналған уыт өндіру тұрғысынан да қызығушылық тудырады [12].

«Тәуелсіздік» сорты - ұлттық селекциялық бағдарламалардың дамуы кезеңінде шығарылған Қазақстандық селекцияның салыстырмалы түрде заманауи сорты. Атауы («Тәуелсіздік») оның тұрақтылық пен әмбебаптыққа бағдарланғанын білдіреді.

«Тәуелсіздік» сортының дәні орташа ірілігімен, шыныылығы мен ақуыздылығының орташа көрсеткіштерімен сипатталады. Бұл сортты қолданылу бағыты тұрғысынан әмбебап етеді және оның уыттық қасиеттерін зерттеу барысында ерекше қызығушылық туғызады [13].

Зерттеудің бірінші кезеңінде зерттелетін сорттардың физика-химиялық сипаттамалары зерделеніп, олардың сыра қайнатуға жарамдылығы тұрғысынан уыттық қасиеттеріне баға берілді (1-кесте).

1-кесте. Зерттелетін бидай үлгілерінің сапа көрсеткіштері

Көрсеткіш	Сыра қайнатуға арналған арпа (МЕМСТ 5060-2021)	Матай	Ертіс	Тәуелсіздік
Ылғалдылық, %	14,5	13,5	13,0	13,5
Дән натурасы, г/л	650 және одан жоғары	760	780	750
1000 дән массасы, г	≥ 45	38	42	36
Шынылығы, %	50-60	65	70	55
Ақуыз мөлшері, %	12	12,5	14,0	11,5
Өнгіштік қабілеті, %, кемінде (жинағаннан кейін 45 күннен ерте емес жеткізілетін дән үшін)	90-95	95	95	95
Тіршілікке қабілеттілігі, %, кемінде (жинағаннан кейін 45 күнге дейінгі мерзімде жеткізілетін дән үшін)	95	90	90	90

Дәннің уыттық қасиеттері дәнді суландыру, өндіру және эндоспермнің ферментативтік модификациясы процестеріне әсер ететін физика-химиялық және физиологиялық көрсеткіштердің жиынтығымен айқындалады. Салыстыру үшін эталондық шикізат ретінде сыра қайнатуға арналған арпа пайдаланылды, оған қойылатын талаптар МЕМСТ 5060-2021 стандартымен реттеледі.

1-кестеде келтірілген деректерге сәйкес зерттелген бидай сорттарының уыттық қасиеттеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Бидай дәнінің ылғалдылығы 13,0-13,5% аралығында өзгерді, бұл сыра қайнатуға арналған арпа үшін рұқсат етілетін шекті мәннен (14,5%) төмен. Мұндай ылғалдылық деңгейі сақтау кезінде дәннің технологиялық тұрақтылығын қамтамасыз етіп, микробиологиялық үдерістердің даму қаупін төмендетеді, бұл шикізатты уыттандыруға дайындау барысында оң фактор болып табылады.

Матай, Ертіс және Тәуелсіздік сорттарының дән натурасы 750-780 г/л болды, бұл сыра қайнатуға арналған арпаға қойылатын ең төменгі талаптардан (кемінде 650 г/л) едәуір жоғары. Аталған көрсеткіштің ең жоғары мәні Ертіс сортында (780 г/л) байқалды, бұл эндоспермнің жақсы толысқанын және тығыздығы жоғары екенін көрсетеді. Дән натурасының жоғары болуы, бір жағынан, экстрактың әлеуетті шығымын арттыруға ықпал етсе, екінші жағынан, дәннің қаттылығының жоғары екенін білдіріп, уыт өсіру кезінде эндоспермнің модификациялану үдерістерін күрделендіруі мүмкін.

Зерттелген бидай сорттарының 1000 дән массасы 36-42 г аралығында болды, бұл сыра қайнатуға арналған арпа үшін оңтайлы мәннен (≥ 45 г) төмен. Дәннің салыстырмалы түрде ірірек болуы Ертіс сортына тән болса, Тәуелсіздік сорты 1000 дән массасының ең төмен мәнімен ерекшеленді. Дәннің жеткіліксіз ірілігі өнудің біркелкілігіне және алынатын уыттың біртектілігіне кері әсер етуі мүмкін.

Зерттелген бидай сорттарының дән шынылығы 55-70% аралығында өзгерді, бұл сыра қайнатуға арналған арпаға тән оңтайлы диапазоннан (50-60%) жоғары. Әсіресе Матай мен Ертіс сорттарындағы шынылықтың жоғары болуы эндосперм құрылымының тығыз екенін және ақуызды заттардың мөлшері жоғарылауын көрсетеді. Бұл уыттандыру кезінде ферментативтік модификация процестерінің жүруін қиындатып, суландыру мен өндіру режимдерін қарқындатуды талап етеді.

Зерттелген бидай сорттарының дәніндегі ақуыз мөлшері 11,5-14,0% құрады. Ақуыздың ең жоғары мөлшері Ертіс сортында (14,0%) анықталды, бұл уыттың экстрактивтілігінің төмендеуіне және суслоның сүзілгіштік қасиеттерінің нашарлау ықтималдығына байланысты оның уыттық құндылығын төмендетеді. Ақуыз мөлшері ең төмен (11,5%) болатын Тәуелсіздік сорты уытқа қойылатын талаптар тұрғысынан анағұрлым қолайлы болып табылады. Дегенмен ақуыздың жоғары мөлшері сыраның көбіктүзгіштік қабілетіне оң әсер етуі мүмкін, бұл сыра өнімдерінің жекелеген түрлерін өндіруде маңызды.

Зерттелген сорттардың барлығы бойынша дәннің физиологиялық күйі қанағаттанарлық деп бағаланды. Егін жинағаннан кейінгі пісіп-жетілу кезеңі аяқталған соң өнгіштік қабілеті 95% болды, ал жаңадан жиналған дәннің тіршілікке қабілеттілігі кемінде 90% құрады. Бұл көрсеткіштер уыттық шикізатқа қойылатын талаптарға сәйкес келеді және біркелкі өнген уыт алуға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері Матай, Ертіс және Тәуелсіздік бидай сорттарының дәні уыт өндірісінде қолдануға жеткілікті физиологиялық белсенділікке ие екенін, алайда технологиялық тұрғыдан маңызды бірқатар көрсеткіштер бойынша сыра қайнатуға арналған арпадан төмен екенін көрсетеді. Уыт өсіру мақсатта қолдану үшін ең перспективалы ақуыз мөлшерінің салыстырмалы түрде төмендігімен және шынылығының орташа деңгейімен сипатталатын Тәуелсіздік сорты болып табылады. Матай және Ертіс сорттары эндоспермнің модификациялану үдерістерін қарқындатуға бағытталған уыт өсіру режимдерін түзетуді қажет етеді. Осыған байланысты сыра қайнатуға арналған уыт өндіру бойынша кейінгі зерттеулер Тәуелсіздік бидай сорты негізінде жүргізілді.

Зерттеудің келесі кезеңінде Тәуелсіздік бидай сорты дәнінің физиологиялық қасиеттерін ескере отырып, уыт өсіру режимдері іріктелді.

Уыт өндіру барысында негізгі бақыланатын параметрлерге уыт өсіру уақыты, температура және дәндегі ылғалдың массалық үлесі жатады.

Арпамен салыстырғанда, бидайды уыт өсіру үшін суландыру кезеңдерінің уақыты қысқарақ болып, олардың саны көбірек болуы ұсынылады. Бұл бидай дәнінде сыртқы қабықшаның болмауына байланысты, соның салдарынан дән ылғалдың массалық үлесін тез жинақтап та, тез жоғалтып та алады, сондай-ақ материалдың жабысып-үйілуі мәселелері туындайды. Бидайды уыт өсіруде жалпы үдерісі арпамен салыстырғанда қысқа уақыт ішінде өтеді [14]. Жүргізілген мониторинг нәтижесінде уыт өсірудің белгілі тәсілдері негізінде 3 режим алынды (1-сурет).

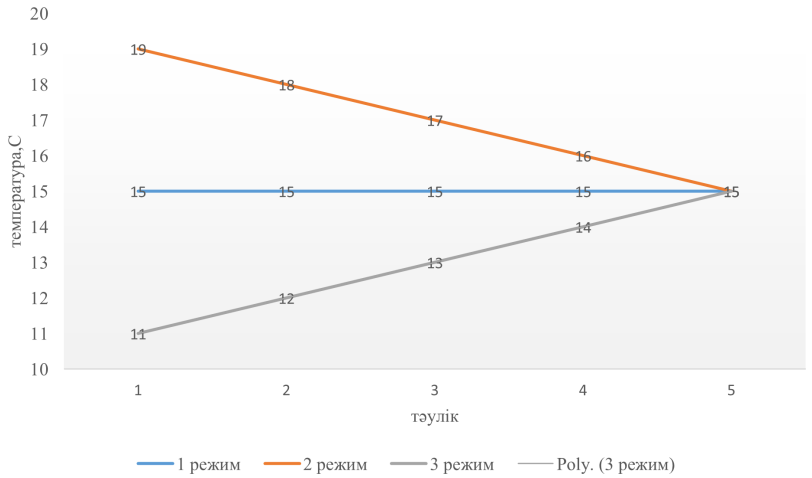
Бірінші уыт өсіру үшін 15ºС температурада 4,5 тәулік бойы жүргізілетін режим таңдалды. Үдерісті тұрақты температурада жүргізу ұрықтың дамуы мен дәннің өсуіне әсер ететін күйзелістік факторларды болдырмауға мүмкіндік береді.

Екінші уыт өсіру жоғары, біртіндеп төмендетілетін температураларда 19ºС-тан бастап, 16ºС-қа дейін біртіндеп азайта отырып, 4 тәулік бойы жүргізілді. Уыт өсіруді жоғары температураларда жүргізу уыт алудың жалпы уақытын қысқартуға, өндірістік шығындарды азайтуға мүмкіндік береді.

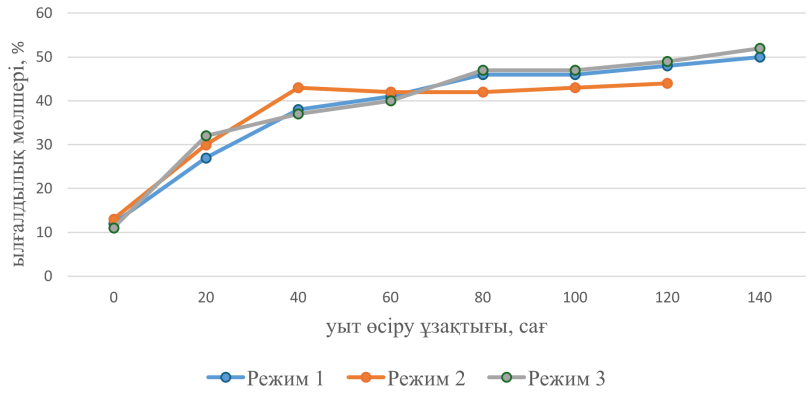
Үшінші уыт өсіруде төмен, біртіндеп жоғарылайтын температуралар қолданылды: үдеріс 11ºС-тан басталып, температура 15ºС-қа дейін біртіндеп көтерілді, өндіру ұзақтығы 5 тәулік болды. Төмен температураларда уыт өсіру кезінде дәннің ерігіштенуі неғұрлым толық жүреді, ферменттердің (амилазалардың) жиналуы жақсарады, сондай-ақ β-глюканның және диметилсульфидтің түзілуі азаяды. Алайда бидайды уыт өсіруде төмен температурада алынған дайын уыт жоғары температураларда алынған бидай уытымен салыстырғанда диастатикалық күштің төменірек деңгейін көрсетеді. Төмен температуралар бидай суслосының тұтқырлығын төмендетуге мүмкіндік береді.

Бидайды өндіру кезінде күн сайын келесі көрсеткіштер бақылауға алынды: ылғалдылық (2-сурет), дәндегі азотты заттар деңгейі (3-сурет), бос аминді азот деңгейі (4-сурет).

2-суретте өндіру барысында ылғал мөлшерінің өзгеруі көрсетілген.



1 - сурет. Уыт өсурідің температуралық режимдері



2 - сурет. Уыт өсіру барысында ылғалдылық мөлшерінің өзгеруі

2-суреттен екінші суландырудан кейін (24 сағаттан соң) бидайдың ылғалды тез жоғалта бастайтыны көрінеді. Бұл үдеріс 1 сағат ішінде шамамен ~1% ылғал жинау жылдамдығымен бірдей қарқынмен жүреді. Сондықтан жиі су бүрку жүргізілді - тәулігіне 4–5 рет.

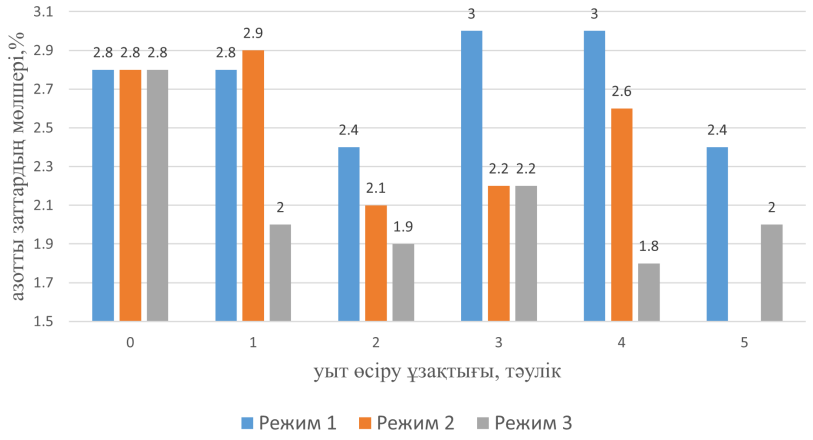
Бидай - қауыссыз дақыл, сондықтан ол арпаға қарағанда ылғалды тезірек сіңіреді және тезірек қайта жоғалтады; осыған байланысты бидай үшін үшінші жібіту кезеңі қолданылмайды.2-суреттен дәнді суға батырған кезде ылғал мөлшерінің күрт артатыны байқалады.1-режим және 2-режим кезінде ылғалдың 36% және 41%-ға дейін (тиісінше) күрт өсуі уыт өсірудің 18-сағатында тіркелді.3-режимде (уыт өсіру температурасы төмен болғанда) 18-сағатта ылғал деңгейінің күрт көтерілуі байқалмады: дәннің ылғалдылығы бірқалыпты артып, ісінуі және өнуі жүрді.

Үш түрлі режимнің графиктерін салыстырғанда, дәндегі ылғалдың 40% деңгейіне жетуі уақыт бойынша ығысумен өтті: 2-режимде (жоғары температурада) - 28 сағатта, 1-режимде (стандартты температурада) - шамамен 40 сағатта, 3-режимде (төмен температурада) - 48 сағатта. Уыттағы ылғалдың ең жоғары мөлшері 3-режимді (төмен температураларда) қолданғанда алынды.

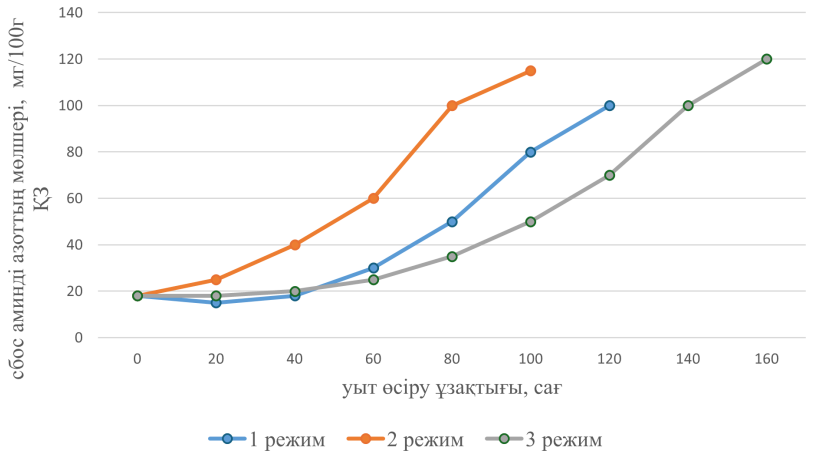
Кезең-кезеңімен су бүрку кезінде дәндегі ылғал мөлшері қатты құбылады: су бүркуден

кейін ылғалдылық тез өсіп, өндіру барысында біртіндеп төмендейді. Дәнді суға батыруға негізделген тәсілдер бидайды уыт өсіру үшін қолайсыз. Демек, бидайды өндіру үшін үздіксіз су бүрку арқылы өндіру әдісі анағұрлым тиімді болып табылады.

3-суретте өндіру барысында дәндегі азотты заттар мөлшерінің өзгерісі көрсетілген.



3 - сурет. Уыт өсіру барысында дәндегі азотты заттар мөлшерінің өзгеруі



4 - сурет. Уыт өсіру үдерісі кезінде аминді азоттың мөлшерінің өзгеруі

3-диаграммадан дәндегі азотты заттардың үлесі үнемі құбылып отыратыны көрінеді. Азотты заттардың төмендеуі дәндегі тыныс алу үдерістері, тамыршалар мен өскіндердің өсуі, сондай-ақ суландыру кезінде ішінара шайылып кетуі есебінен жүрді. Сыра қайнатуға арналған арпада азотты заттар мөлшерінің төмендеуі уыт өсірудің шамамен 4-тәулігінде байқалса, бидайда бұл төмендеу шамамен 2-тәулікте көрінеді. Осы кезеңде суландыру үдерісі аяқталды, яғни үдерістің басынан аяқталғанға дейін азотты заттардың шайылуы орын алды. Төмен температурадағы үшінші режимде суландыру ең ұзақ болды, соған байланысты азотты заттардың азаюы да ең жоғары деңгейде байқалды, бұл 3-суретте расталады.

Бос аминді азот деңгейі бойынша ақуыздардың гидролизін бағалауға болады: бұл көрсеткіш қаншалықты жоғары болса, соншалықты көп ақуыз ыдырағанын білдіреді. Бос аминді азот ашытқылар үшін негізгі қоректік көз болып табылады. Бидай уыты үшін арпа уытымен салыстырғанда ақуыздардың азырақ қарқынды ыдырауы қолайлы, себебі бұл бидай уытына тән

хош иісті қалыптастыруға мүмкіндік береді. Бидай уытында бос аминді азоттың мөлшері шамамен 90–120 мг/100 г құрғақ затқа (ҚЗ) тең болуы тиіс. 4-суретте уыт өсіну барысында аминді азот мөлшерінің өзгеруі көрсетілген.

Өндіру барысында аминді азот мөлшерінің өзгерісін зерттеу уыт өсіру температурасына тікелей тәуелділікті көрсетті (4-сурет). Уыт өсіру үдерісін жоғары температурада жүргізгенде және соған сәйкес қысқа мерзімде (2-режим) аминді азоттың жиналуы төмен температураларда әрі ұзақ уыттандыру кезінде (3-режим) қарағанда жылдамырақ жүрді.

Уыт өсірудің үш түрлі режимін зерттеу нәтижелері ең оңтайлысы 2-режим (жоғары, біртіндеп төмендетілетін температуралардағы уыттандыру) екенін көрсетті. Осы режим бойынша алынған уыт үлгісінде ақуыз мөлшері ең төмен болды және амилолитикалық ферменттердің ең көп мөлшері түзілді (көрсеткіші: диастатикалық күш). Бұл уыт өсіру технологиясы дайын уыттың сапасын жақсартатын параметрлерді ғана емес, сонымен қатар уыт өсірудің қысқарақ уақытын да қамтиды.

Қорытынды. Осы зерттеудің мақсаты Қазақстан Республикасының отандық селекциялы бидай сорттарынан сыра қайнату өнеркәсібінің қажеттіліктері үшін бидай уытын өндірудің мақсатқа сәйкестігін негіздеу болды. Қойылған мақсатқа жету үшін ғылыми-техникалық және нормативтік әдебиеттерді талдау мен жалпылау әдістері, сондай-ақ дән мен уыт сапасын бағалаудың жалпы қабылданған физика-химиялық, биохимиялық және технологиялық әдістері қолданылды. Эксперименттік бөлім Тәуелсіздік бидай сортының әртүрлі температуралық-уақыттық уыт өсіру режимдерін іріктеу және салыстыруды, сондай-ақ ылғал жинақталуы динамикасын, масса жоғалтуларын, азотты заттар мөлшерін және бос аминді азот деңгейін бақылауды қамтыды.

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде Матай, Ертіс және Тәуелсіздік бидай сорттарының дәні жоғары физиологиялық белсенділікпен және қанағаттанарлық өнгіштік көрсеткіштерімен сипатталатыны анықталды, бұл оны уыт өндіруге арналған әлеуетті шикізат ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, сорттардың уыттық құндылығына әсер ететін физика-химиялық сипаттамалары бойынша елеулі айырмашылықтар белгіленді. Ең перспективалысы ақуыз мөлшері мен шынылығы орташа деңгейде болатын Тәуелсіздік сорты болып шықты, бұл эндоспермнің ферментативтік модификациялануына қолайлырақ жағдай жасайды. Уыт өсіру режимдерін эксперименттік іріктеу температура мен өндіру ұзақтығы ылғал жинақталуының динамикасына және ақуызды заттардың гидролизіне шешуші әсер ететінін көрсетті. Жоғары температуралық режимдер қысқа уақыт ішінде бос аминді азоттың қарқынды жиналуына ықпал етсе, төмен температуралық уыт өсіру дәннің анағұрлым біркелкі модификациялануын және бидай суслосының тұтқырлығының төмендеуін қамтамасыз етті. Сондай-ақ, бидай үшін арпаға тән көп мәрте суландырудың болдырмайтын, үздіксіз су бүрку арқылы өндіру әдісі қолайлы екені анықталды.

Алынған деректер негізінде қазақстандық бидай сорттарынан сыра қайнату өнеркәсібінің талаптарына сәйкес келетін ферментативтік белсенділік және азотты алмасу көрсеткіштері бар бидай уытын алудың принциптік мүмкіндігі туралы қорытындылар жасалды. Уыт өсіру режимдерін оңтайландыру жағдайында отандық селекциялы бидай дәні алдын ала белгіленген технологиялық қасиеттері бар уыттың қалыптасуын қамтамасыз ете алады деген ұсынылған гипотеза расталды. Сонымен бірге шынылығы және ақуыз мөлшері жоғары сорттардың модификация үдерістерін қарқындатуға бағытталған технологиялық параметрлерді түзетуді қажет ететіні көрсетілді.

Зерттеу нәтижелерін тәжірибелік тұрғыдан енгізудің мүмкіндіктері Қазақстанның сыра қайнату саласының шикізат базасын жергілікті дәнді шикізатты пайдалану есебінен кеңейтумен, импорттық бидай уытына тәуелділікті төмендетумен және өнімнің өзіндік құнын оңтайландырумен байланысты.

Дайындалған уыт өсіру режимдері бидай уытын өнеркәсіптік көлемде өндіруде қолданылуы

мүмкін, сондай-ақ уыт өсіру технологияларын жетілдіруге, уыттың оңтайлы түрлерін іріктеуге және алдын ала белгіленген органолептикалық сипаттамалары бар бидай сырасының жаңа түрлерін жасауға бағытталған кейінгі зерттеулерге негіз бола алады.

Мақаланы дайындау барысында жасанды интеллект құралдары, соның ішінде OpenAI ұсынған GPT-4 тілдік моделі қолданылды. Модель тек мәтінді редакциялауға және ғылыми экспозицияны құрылымдауға көмектесу үшін қолданылды. Барлық нәтижелер автордың жеке еңбегімен алынған.

Әдебиеттер

1. Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива: пер. с нем. - СПб.: Профессия, 2001. - 912 с.- ISBN 5-93913-006-2.

2. Briggs D.E., Boulton C.A., Brookes P.A., Stevens R. Brewing: Science and Practice. - Cambridge: Woodhead Publishing; Boca Raton: CRC Press, 2004. - 882 p. ISBN 978-1-85573-490-6.

3. Kunze W. Technology Brewing & Malting. - 5th revised English ed. - Berlin: VLB Berlin, 2014. - ISBN 978-3-921690-77-2.

4. Нарцисс Л. Пивоварение. Т.1: Технология солодоращения: пер. с нем. / под общ. ред. Г. А. Ермолаевой, Е. Ф. Шаненко; пер. А. С. Яблоковой. - СПб.: Профессия, 2007. - 584 с. ISBN 5-93913-118-2.

5. Меледина Т.В., Прохорчик И.П., Кузнецова Л.И. Биохимические процессы при производстве солода - СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. - 89 с.

6. Stewart G.G., Priest F.G. (eds.). Handbook of Brewing. - 2nd ed.- Boca Raton: CRC Press, 2006. - 872 p. ISBN 0-8247-2657-X

7. Bamforth C.W. Beer: Tap into the Art and Science of Brewing. - 3rd ed.-Oxford: Oxford University Press, 2009. - ISBN 978-0-19-530542-5.

8. FAO. FAOSTAT: Production: Crops and livestock products (Wheat): dataset. - Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, [online]. -URL: data.un.org/Data.aspx?d=FAO&f=itemCode%3A15 - (accessed on 15.12.2025).

9. Bamforth C. W. (ed.). Beer: A Quality Perspective. - Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press, 2009. - ISBN 978-0-12-669201-3.

10. Faltermaier A., Waters D., Becker T., Arendt E.K., Gastl M. Common wheat (Triticum aestivum L.) and its use as a brewing cereal - a review // Journal of the Institute of Brewing. - 2014.- Vol.120(1). - P.1-15. DOI 10.1002/jib.107.

11. Poreda A., Bijak M., Zdaniewicz M., Jakubowski M., Makarewicz M. Effect of wheat malt on the concentration of metal ions in wort and brewhouse by-products // Journal of the Institute of Brewing. - 2015. - Vol.121(2). - P.224-230. DOI 10.1002/jib.226.

12. ASBC. Methods of Analysis: online edition. - American Society of Brewing Chemists, [online]. - URL: asbcnet.org/methods. - (accessed on 15.12.2025)

13. Меледина Т.В. Сырье и вспомогательные материалы в пивоварении. - СПб.: Профессия, 2003. - 350 с. ISBN 5-93913-054-2.

14. Bakytzhan D., Askarbekov E., Klupsaite D., Mockus E., Starkute V., Mozuriene E., Ruibys R., Bartkiene E. Effects of different wheat malt on beer characteristics, including amino acids, gamma aminobutyric acid, biogenic amines, and volatile compounds // Applied Food Research. - 2025. - Vol.5(2):101203. DOI 10.1016/j.afres.2025.101203.

References

1. Kunce V., Mit G. Tehnologija soloda i piva: per. s nem. - SPb.: Professija, 2001.- 912 s.- ISBN 5-93913-006-2. [in Russian]

2. Briggs D.E., Boulton C.A., Brookes P.A., Stevens R. Brewing: Science and Practice. - Cambridge: Woodhead Publishing; Boca Raton: CRC Press, 2004. - 882 p. ISBN 978-1-85573-490-6.

3. Kunze W. Technology Brewing & Malting. - 5th revised English ed. - Berlin: VLB Berlin, 2014. - ISBN 978-3-921690-77-2.

4. Narciss L. Pivovarenie. T.1: Tehnologija solodorashhenija: per. s nem. / pod obshh. red. G. A. Ermolaevoj, E. F. Shanenko; per. A. S. Jablokovoj. - SPb.: Professija, 2007. - 584 s. ISBN 5-93913-118-2. [in Russian]

5. Meledina T.V., Prohorchik I.P., Kuznecova L.I. Biohimicheskie processy pri proizvodstve soloda - SPb.: NIU ITMO; IHiBT, 2013. - 89 s. [in Russian]

6. Stewart G.G., Priest F.G. (eds.). Handbook of Brewing. - 2nd ed.- Boca Raton: CRC Press, 2006. - 872 p. ISBN 0-8247-2657-X

7. Bamforth C.W. Beer: Tap into the Art and Science of Brewing. - 3rd ed.-Oxford: Oxford University Press, 2009. - ISBN 978-0-19-530542-5.

8. FAO. FAOSTAT: Production: Crops and livestock products (Wheat): dataset. - Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, [online]. -URL: data.un.org/Data.aspx?d=FAO&f=itemCode%3A15 - (accessed on 15.12.2025).

9. Bamforth C. W. (ed.). Beer: A Quality Perspective. - Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press, 2009. - ISBN 978-0-12-669201-3.

10. Faltermaier A., Waters D., Becker T., Arendt E.K., Gastl M. Common wheat (Triticum aestivum L.) and its use as a brewing cereal - a review // Journal of the Institute of Brewing. - 2014.- Vol.120(1). - P.1-15. DOI 10.1002/jib.107.

11. Poreda A., Bijak M., Zdaniewicz M., Jakubowski M., Makarewicz M. Effect of wheat malt on the concentration of metal ions in wort and brewhouse by-products // Journal of the Institute of Brewing. - 2015. - Vol.121(2). - P.224-230. DOI 10.1002/jib.226.

12. ASBC. Methods of Analysis: online edition. - American Society of Brewing Chemists, [online]. - URL: asbcnet.org/methods. - (accessed on 15.12.2025)

13. Meledina T.V. Syr’ e i vspomogatel’ nye materialy v pivovarenii. - SPb.: Professija, 2003.- 350 s. ISBN 5-93913-054-2. [in Russian]

14. Bakytzhan D., Askarbekov E., Klupsaite D., Mockus E., Starkute V., Mozuriene E., Ruibys R., Bartkiene E. Effects of different wheat malt on beer characteristics, including amino acids, gamma aminobutyric acid, biogenic amines, and volatile compounds // Applied Food Research. - 2025. - Vol.5(2):101203. DOI 10.1016/j.afres.2025.101203.

Авторлар туралы мәлімет

Бакытжан Д. Н. - Алматы технологиялық университетінің, Алматы, Қазақстан, e-mail: didar_99_kz@mail.ru;

Аскарбеков Э.Б. - PhD, қауымдастырылған профессор. Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: erik_ab82@mail.ru;

Новикова И. В. - т. ғ. д., доцент, ФГБОУ ВО ”Воронежский государственный университет инженерных технологий”, Ресей Федерациясы, e-mail: noviv@list.ru;

Кекибаева А.К. - PhD, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: kekibaevaa@gmail.com;

Байгазиева Г. И. - б. ғ. к., профессор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: gulgaisha.atu@gmail.com.

Information about the authors

Bakytzhan D. N. - Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: didar_99_kz@mail.ru:

Askarbekov E. B. - PhD, associate professor. K. Kulazhanov Kazakh University of technology and business,Astana, Kazakhstan, e-mail: erik_ab82@mail.ru:

Novikova I. V. - Doctor of technical sciences, associate professor, FSBEI HE ”Voronezh State University of engineering technologies”, Russian Federation, e-mail: noviv@list.ru;

Kekibayeva A. K. - PhD, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: kekibaevaa@gmail.com;

Baigazieva G. I - candidate of biological sciences, professor, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: gulgaisha.atu@gmail.com.

ҒТАМР 65.53.33 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1385**

БАҚША ЖӘНЕ КӨКӨНІС ДАҚЫЛДАРЫН КЕПТІРУДІҢ ОҢТАЙЛЫ РЕЖИМДЕРІН ЖӘНЕ АЛЫНҒАН ҰНТАҚТАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Г.Е. Жумалиева, У.Ч. Чоманов, А.Б. Байзақова, А.К. Шоман

«Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Алматы қаласы филиалы, Казақстан

Корреспондент-автор: guljan_7171@mail.ru

Бұл зерттеуде лиофильді және инфрақызыл кептіру арқылы алынған бақша және көкөніс дақылдары ұнтақтарын кешенді зерттеу жүргізілді. Зерттеудің мақсаты — дайын өнімдердің технологиялық, органолептикалық, физико-химиялық, түс және витаминдік қасиеттеріне әртүрлі кептіру режимдерінің әсерін бағалау болды.

Зерттеу нысандары ретінде отандық қызанақ пен қарбыз сорттары алынды. Ұнтақтар әртүрлі температуралық және вакуумдық режимдерде лиофильді кептіру және инфрақызыл кептіру арқылы алынды. Алынған үлгілердің ылғалдылығы, титрленетін және активті қышқылдығы, органолептикалық қасиеттері, CIE Lab* жүйесі бойынша түс сипаттамалары және жоғары өнімді сұйық хроматография әдісі арқылы витаминдік құрамы зерттелді.

Зерттеу нәтижесінде өнімнің құрылымы, табиғи түсі және дәмі сақталған, қалдық ылғалдылығы 12,5–13,4 % болатын ұнтақтар алынды. Лиофильді кептіру режимі –40 °С және –55 °С температурада, ал инфрақызыл кептіру қызанақ үшін 60 °С, қарбыз үшін 50 °С температурада жүргізілгенде ұнтақтар жоғары түстік қанықтылыққа және түс тұрақтылығына ие болды. Витаминдік талдау А, Е, С және В дәрумендерінің жоғары деңгейін көрсетті, бұл өнімнің биологиялық құндылығын растайды.

Зерттеу нәтижелері мұздатып кептіру және инфрақызыл кептіру әдістерін қолданудың қауын мен қызанақ сияқты бақша дақылдарын өңдеуде және функционалды ұнтақ өнімдерін алуда перспективалы екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: қарбыз, қызанақ, ұнтақтар, бақша мен көкөніс дақылдары, инфрақызыл кептіру, лиофильді кептіру.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СУШКИ БАХЧЕВЫХ И ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР И ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУЧЕННЫХ ПОРОШКОВ

Г.Е. Жумалиева, У.Ч. Чоманов, А.Б. Байзакова, А.К. Шоман

Филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности» в г. Алматы, Казахстан,
e-mail: guljan_7171@mail.ru

В данном исследовании проведено комплексное изучение порошков из бахчевых и овощных культур, полученных методом лиофильной и инфракрасной сушки. Целью исследования являлась оценка влияния различных режимов сушки на технологические, органолептические, физико-химические, цветовые и витаминные свойства готовой продукции.

В качестве объектов исследования были выбраны отечественные сорта томата и арбуза. Порошки получали при различных температурных и вакуумных режимах лиофильной и инфракрасной сушки. Полученные образцы анализировали по показателям влажности, титруемой и активной кислотности, органолептическим свойствам, цветовым характеристикам по системе CIE Lab*, а также по витаминному составу с использованием метода высокоэффективной жидкостной хроматографии.

В результате исследования были получены порошки с остаточной влажностью 12,5–13,4 %, характеризующиеся сохранением структуры, естественного цвета и вкуса продукта. Установлено, что при лиофильной сушке при температурах –40 °С и –55 °С, а также при инфракрасной сушке при температуре 60 °С для томата и 50 °С для арбуза, порошки обладают высокой цветовой насыщенностью и стабильностью окраски. Анализ витаминного состава показал высокое содержание витаминов А, Е, С и группы В, что подтверждает высокую биологическую ценность продукции.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения лиофильной и инфракрасной сушки для переработки бахчевых и овощных культур, таких как арбуз и томат, и получения функциональных порошкообразных продуктов.

Ключевые слова: арбуз, томат, порошки, бахчевые и овощные культуры, инфракрасная сушка, лиофильная сушка.

STUDY OF OPTIMAL DRYING REGIMES FOR MELON AND VEGETABLE CROPS AND THE CHARACTERISTICS OF THE OBTAINED POWDERS

G. Zhumalieva✉, U. Chomanov, A. Baizakova, A. Shoman

Branch of LLP "Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry" in Almaty, e-mail: guljan_7171@mail.ru

In this study, a comprehensive investigation of powders obtained from melon and vegetable crops using freeze-drying and infrared drying was conducted. The aim of the study was to evaluate the effect of different drying regimes on the technological, organoleptic, physicochemical, color, and vitamin properties of the final products.

Domestic tomato and watermelon varieties were selected as the research objects. The powders were produced under various temperature and vacuum conditions using freeze-drying and infrared drying methods. The obtained samples were analyzed for moisture content, titratable and active acidity, organoleptic properties, color characteristics using the CIE Lab* system, and vitamin composition by high-performance liquid chromatography.

The results showed that powders with a residual moisture content of 12.5–13.4% were obtained while preserving the structure, natural color, and taste of the products. Freeze-drying at –40 °C and –55 °C and infrared drying at 60 °C for tomato and 50 °C for watermelon provided powders with high color saturation and color stability. Vitamin analysis revealed high levels of vitamins A, E, C, and B-group vitamins, confirming the high biological value of the products.

The results demonstrate the potential of freeze-drying and infrared drying for processing melon and vegetable crops, such as watermelon and tomato, and for producing functional powdered products.

Keywords: watermelon, tomato, powders, melon and vegetable crops, infrared drying, freeze-drying.

Кіріспе. Тамақтану - ағзаның қалыпты жұмыс істеуі мен өнімділігін және денсаулықы сақтаудың негізгі факторы болып табылады. Ғылымда 19 ғасырдың аяғы мен 20 ғасырдың басында жүргізілген зерттеулер, біздің қазіргі заманғы қоректік қажеттіліктер туралы түсінігімізді қалыптастырды. Барлығына белгілі маңызды қоректік заттар ретінде - аминқышқылдары, май қышқылдары, дәрумендер және минералдар болып саналады.20 ғасырдың басында негізі қаланған тамақтану теориясы бүгінгі күнге дейін өзінің өзектілігін сақтаған. Бұл теорияның негізгі қағидасы: тамақтану - бұл ағзаның химиялық және биологиялық құрамын сақтау және теңестіру процесі. Уақытылы және сапалы тамақтану ағзаның қалыпты жұмыс істеуін қамтамасыз ететін тағам компоненттерінің оңтайлы арақатынасын білдіреді.

Ағзаның бейімделу қасиетін сақтау үшін тағам рационында ақуыздар, дәрумендер және

биологиялық белсенді қосылыстар және макро және микроэлементтер болуы керек.

Қазіргі уақытта медициналық зерттеулер қатерлі ісікке қарсы дәрі іздеуде. Химиялық препараттардан басқа, зерттеушілер табиғи антиоксидант ликопинді қатерлі ісік қаупінің төмендеуіне ықпалын тигізетіні анықтады. 2001 жылы жүргізілген клиникалық сынақтың алғашқы нәтижелері ликопиннің қуық асты безі қатерлі ісігі жасушаларының өсу қарқынын төмендететінін көрсетті. Бұл әдіс қатерлі жасушалардың таралуын 73%-ға дейін азайтқан. 3 ерттеулерде 46 түрлі жеміс-жидек пен көкөністің ішінде тек қызанақ қатерлі ісік қаупінің төмендеуімен айқын әсер ететіні байқалған [1].

Адам тағам құрамында кездесетін 60 каротиноидтың ішіндегі ең маңыздысы- ликопин және бета-каротин. Бұл каротиноидтардың ерекшелігі, олардың хромофоры, ол қос байланыстардың ұзын тізбегінен тұрады, бұл оларды табиғи пигменттерге айналдырады. Кейбір өсімдіктерде, басқа каротоидтарнмен қатар, белгілі бір каротиноидтың басым концентрациясы бар (мысалы, қызанақта ликопин, сары жүгерідегі криптоксантин және т.б.).

Ликопин ($C_{40}H_{56}$) - қызыл жемістер мен көкөністерде (қызанақ, бұрыш, қарбыз, қызғылт грейпфрут, өрік) кездесетін каротиноидтар тобына жататын пигмент, бұл өсімдік текті тағамдарға қызыл түс береді. Суда ерімейді және майларда ериді. Ликопиннің антиоксиданттық белсенділігі бета-каротиндерден үш есе жоғары [2]. Піспенан өндірісінде функционалды ингредиент ретінде қызанақ және қарбыз ұнтағын таңдау келсі факторларға негізделген: республикадағы ауыл шаруашылығы және қайта өңдеу кәсіпорындарында өсімдік материалдары мен шырын өндірісінің қалдықтарынан тамақ өнімдеріне арналған ұнтақтар өндіру, қалдықсыз өндірісті дамытуға мүмкіндік береді. Қызанақты және қарбызды өңдеу кезінде пайда болатын қосалқы өнімдер тағамдық қоспаларды өндіру үшін құнды шикізат болып табылады [3].

Қызанақтың химиялық құрамы жағынан ерекше және сортына, өсіру жағдайларына және технологиясына байланысты өзгеріске аз ұшырайды. Құрамындағы оңай сіңетін макронутриенттер, орташа есеппен 16,5 г тағамдық талшық және барлық маңызды аминқышқылдары бар ақуыздар және омега-3 және омега-6 май қышқылдарына бай келеді. Калий, кальций, магний, натрий, фосфор, темір, марганец, мыс, селен және мырышқа бай. Витаминдерден қызанақ құрамында В дәрумендері, С, А, Е және К дәрумендері, сондай-ақ каротиноидтар бар, олардың басым бөлігі ликопин болып табылады [4, 5].

Ликопин қызанақ ұнтағына қызыл түс беріп қана қоймай, сонымен қатар күшті табиғи антиоксидант. Тағамдық қышқылдардың орташа мөлшері 0,5%, тағамдық талшық 0,8% және пектин 0,3% құрайды. Қызанақтар Е дәрумені, ниацин және пантотен қышқылының ең көп мөлшері бар көкөністердің қатарына жатады, ал пектин холестеринді төмендетуге көмектеседі[6].

Қызанақ антидепрессанттық әсерге ие, серотониннің болуына байланысты жүйке жүйесін реттейді, сондай-ақ бактерияға қарсы және қабынуға қарсы қасиеттерге ие. Осы қасиеттердің барлығын сақтай отырып, қызанақ ұнтағы табиғи бояғыш және хош иістендіргіш ретінде кеңінен қолданылады. Ол өнімдерге қышқыл дәм, айқын хош иіс және қанық қызыл түс береді[7].

Қызанақ және қарбыз ұнтақтары, сондай-ақ олардан жасалған қоспалар ликопинге, цитруллинге, дәрумендерге және минералдарға бай, бұл оларды адам денсаулығын сақтаудың тиімді құралы етеді. Олар антиоксидантты, қабынуға қарсы және кардиопротекторлық қасиеттерге ие, жүрек-қан тамырлары аурулары мен қатерлі ісіктің алдын алуға және ылғалдануды сақтауға көмектеседі.

Қарбыз және қызанақ ұнтағы - ликопинге, дәрумендер мен минералдардың қоймасы болып табылатын концентрлі өнім. Ликопин бос радикалдарды бейтараптандырады, жасушалардың зақымдануын тежейді және қабынуды азайтады. Ол жүрек-қан тамырлары ауруларының, атеросклероздың және қатерлі ісіктің алдын алуда маңызды рөл атқарады[8].

Қарбыз ұнтағы ликопинмен қатар, С және А дәрумендеріне және цитруллинге де бай. Цитруллин қан айналымын жақсартады және қан қысымын төмендетеді, бұл қарбыз ұнтағын гипертониясы бар адамдар үшін пайдалы етеді. Ол сондай-ақ су-тұз балансын реттейді және гидратацияны жақсартады.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу нысандары ретінде қарбыз бен қызанақ алынды.

Зерттеу барысында стандарттарға сәйкес келесі әдістемелер қолданылды:

- МЕМСТ ISO 750-2013 - Жеміс және көкөніс өнімдерін өңдеу өнімдері;

- МЕМСТ 29031-91 - Құрғақ заттардың мөлшерін анықтау әдісі. Құрғақ заттардың мөлшері СНЕЛ-104 рефрактометрінде анықталды. Шикізат пен дайын өнімнің ылғалдылығы МХ-50 ылғалөлшегішімен өлшенді. Өлшеу нұсқаулыққа сәйкес жүргізілді: 5 г сынама алынып, табақшаға біркелкі жайылып, 130 °С температурада 40 минут кептірілді;

- МЕМСТ 34130-2017 - Қызанақ ұнтағының органолептикалық сапа көрсеткіштерін анықтау;

- МЕМСТ EN 12823-2-2014 - Тағам өнімдеріндегі ликопин мөлшерін жоғары өнімді сұйық хроматография әдісімен анықтау;

- МЕМСТ 5898–87 - Қышқылдық пен сілтілікті анықтау;

- МЕМСТ Р 51478-99 (ISO 2917-74) - Сутек иондары концентрациясын (pH) анықтау;

- МЕМСТ Р ISO 22935-2-2011 - Органолептикалық бағалау әдістері;

- testo 206-pH1 pH-метрі арқылы активті қышқылдықты анықтау;

- МЕМСТ EN 12823-2-2014 - А витаминінің мөлшерін жоғары өнімді сұйық хроматография әдісімен анықтау;

- МЕМСТ EN 12822-2014 - *Е витаминінің (α-, β-, γ-, δ-токоферолдар) мөлшерін жоғары өнімді сұйық хроматография әдісімен анықтау;*

- МЕМСТ 34151-2017 - *С витаминін жоғары өнімді сұйық хроматография әдісімен анықтау;*

- бақша және көкөніс дақылдарынан кептірілген ұнтақтарды алу әдістері.

Ликопинге бай ұнтақтарды бақша және көкөніс дақылдарынан алу үшін екі әдіс қарастырылды, лиофильді кептіру және инфрақызыл кептіру. Қызанақ пен қарбыз массасынан артық ылғалды жою үшін TAGLER ЦЛМН 1-8 зертханалық центрифугасы қолданылды.

Лиофильді кептіру - өнімдегі суды төмен температура мен төмен қысымда сублимация арқылы (мұздың тікелей буға айналуы) жою процесі. Бұл әдіс ликопин сияқты қоректік заттар мен биологиялық белсенді қосылыстардың көп бөлігін сақтауға мүмкіндік береді, себебі процесс төмен температурада өтеді, бұл сезімтал компоненттердің термиялық бұзылуын азайтады. Лиофильді кептіру сондай-ақ бастапқы өнімнің құрылымын және дәмін сақтайды, сонымен қатар оның массасын едәуір азайтады, бұл тасымалдау және сақтау процесін жеңілдетеді. Бұл процесс бірнеше негізгі кезеңнен тұрады:

- алдын ала мұздату - шикізат төмен температураға дейін мұздатылады, бұл жасуша ішінде мұз кристалдарының түзілуіне ықпал етеді.

- біріншілік (сублимациялық) кептіру - төмен қысымда бос ылғалды жою, мұнда су қатты күйден (мұз) бу күйіне өтеді, сұйық фазадан өтпей.

- екіншілік (десорбциялық) кептіру - байланысқан ылғалды одан әрі төмен қысым мен температурада жою.

Лиофильді кептіру биологиялық және фармацевтикалық препараттарды, сондай-ақ тағам өнеркәсібінде жемістер, көкөністер және басқа өнімдерді кептіру үшін белсенді қолданылады.

Зертханалық жағдайда лиофилизация процесін Martin Christ Alpha 1-2 LD Plus лиофильді кептіргішімен жүзеге асырылды.

Инфрақызыл кептіру инфрақызыл сәулелену қолдану арқылы материалдан ылғалды жоюға негізделген. Инфрақызыл сәулелену су молекулаларына тікелей әсер етіп, олардың қызуынан ылғалдың тез буланууына әкеледі. Бұл әдіс дәстүрлі кептіру әдістеріне қарағанда жылдамы-

рақ және энергияны аз қажет етеді, мысалы, ыстық ауада кептіру немесе тіпті лиофилизация. Сонымен қатар, бұл әдіс органолептикалық қасиеттерді, мысалы, түс пен дәмді сақтауға ықпал етеді және жақсы дәмдік қасиеттері бар, салыстырмалы түрде жоғары ликопин концентрациясы бар ұнтақтарды тиімді алуға мүмкіндік береді.

Жемістер үшін Basic Station 3 инфрақызыл кептіргіш шкафы пайдаланылды.

Қызанақ және қарбыз ұнтақтары ірі жемісті қызанақтарды ұсақтау, IKA A11 basic (ИКА, Германия) аналитикалық ұнтақтағыш арқылы алынды.

Нәтижелер және талқылау. Зерттеуде сублимациялық кептіру және инфрақызыл кептіру арқылы жаңа піскен қызанақтар мен қарбыздардан ликопинге бай құрғақ ұнтақтарды алу әдістері қолданылды. Бұл әдіс ликопин сияқты биологиялық белсенді заттарды сақтау тиімділігін қамтамасыз етеді, сондай-ақ әртүрлі технологиялардың осы заттардың сақталуына және алынған ұнтақтардағы ликопин мөлшеріне әсерін зерттеуге мүмкіндік береді.

Зерттеу нысандары ретінде қызанақ пен қарбыздың отандық сорттары пайдаланылды.

Ликопинге бай қызанақ пен қарбыздан құрғақ ұнтақтарды алудың екі әдісі қарастырылды: жеміс-жидек және көкөніс ұнтақтарын алу үшін тамақ өнеркәсібінде кеңінен қолданылатын мұздатып кептіру (лиофильді) және инфрақызыл кептіру.

Лиофилизация төмен температурада және төмен қысымда жүзеге асырылады, бұл мұзда сублимация арқылы суды кетіреді, жылу әсерін азайтады және осылайша ликопинді қоса алғанда, термосезімтал заттардың максималды мөлшерін сақтайды. Инфрақызыл кептіру, керісінше, материалды инфрақызыл сәулелену арқылы қыздырады, бұл кептіру процесін жеделдетеді, бірақ жылу әсерінен биологиялық белсенді заттардың жоғалуы жоғары болуы мүмкін.

Ликопинді сақтау және алынған ұнтақтардың сапасын бағалау үшін жоғарыда аталған әдістердің тиімділігі анықталды және жоғары тағамдық және функционалдық құндылығы бар ликопинге бай өнімдерді алудың ең тиімді әдісі таңдалды.

Қызанақ пен қарбыздан құрғақ ұнтақты лиофилизация әдісімен алудың технологиялық процесі

Шикізат дайындау үшін қызанақ пен қарбызды, артық ылғалды кетіру үшін центрифугаланды. Шикізат ретінде жаңа піскен қызанақ пен қарбыздар алынып, мұқият жуылып, кептірілді. Содан кейін жемістер біртекті масса алу үшін блендерде араластырылды. Алынған массаны центрифугаға салып, 25°С температурада және 15 000 айн/мин жылдамдықта 20 минут центрифугаланды.

Центрифугалау нәтижесінде бастапқы ликопин мен басқа да биологиялық белсенді қосылыстары бар қызанақ және қарбыз целлюлозасынан тұратын концентрлі тұнба алынды. Артық сұйықтық тиімді түрде жойылды. Алынған қызанақ пен қарбыз целлюлозасы 10-25 мм қалыңдықтағы қабатта арнайы табаларға біркелкі орналастырылып, лиофилизацияға жіберілді

Алдын ала мұздату -10°С температурада 12 сағат бойы жүргізілді, себебі бұл кезең лиофилизацияға арналған үлгілерді дайындау үшін қажет және материалдан суды тиімді түрде кетіру үшін мұз кристалдарының пайда болуын қамтамасыз етеді.

1. Тәжірибе дайын өнімнің қалдық ылғалдылығын 10-12% деңгейінде ұстау мақсатында үш нұсқада жүргізілді. Кептіру ұзақтығы әр нұсқаның жағдайына байланысты 24-тен 48 сағатқа дейін өзгеріп отырылды, бұл кезеңде өнімнің ылғалдылығы біртіндеп төмендеді.

Қызанақ пен қарбыз үшін үш түрлі кептіру режимі таңдалды, олардың әрқайсысы температура мен вакуумдық әсерді екі кезеңде біріктіреді. Бұл режимдер зерттеліп жатқан өнімдердің суды ұстау қабілеті мен жылуға сезімталдығын ескере отырып, әртүрлі параметрлердің ылғалды кетіру тиімділігіне және биологиялық белсенді заттардың сақталуына әсерін бағалау үшін әзірленді. Режимдер теориялық сублимациялық кептіру болжамдары және төмен температура мен

қысымда өсімдік тіндерінің мінез-құлқын зерттеу нәтижелеріне негізделген.

Нұсқа 1: кезең 1 - – 30°C, 0,37 mBar; кезең 2 — –45°C, 0,1 mBar.

Нұсқа 2: кезең 1 - – 35°C, 0,5 mBar, 10 сағ; кезең 2 — –55°C, 0,2 mBar.

Нұсқа 3: кезең 1 - – 40°C, 0,3 mBar; кезең 2 — –55°C, 0,05 mBar.

Бірінші нұсқадағы кептіру режимі (температура -30°C, қысым 0,37 мБар, ұзақтығы 12 сағат) бірінші кезеңде еріген суды мұз кристалдары түрінде мұздатуды қамтамасыз етті және оны сублимация арқылы тиімді түрде кетіруге мүмкіндік берді. Екінші кезеңде температура -45°C дейін, қысым 0,1 мБар, ұзақтығы 10 сағатқа дейін төмендетілді, бұл өнім құрылымында берік ұсталатын байланысқан ылғалға әсер етуге мүмкіндік берді.

Екінші нұсқада бірінші кезеңде 10 сағат бойы -35°C төмен температура, бірақ 0,5 мБар жоғары қысым қолданылды. Бұл жағдайлар бос судың кристалдануы мен сублимациясы үшін онша тиімді болмады, себебі мұздатудың жеткіліксіздігі және жоғары қысым фазалық ауысу процесін баяулатуы мүмкін. Екінші кезеңде -55°C температура, қысым 0,2 мБар, 10 сағат - қосымша ылғалды кетіруді қамтамасыз етті.

Үшінші нұсқа бірінші кезеңде температураны (-40°C) төмендету және қысымды (0,3 мБар) төмендету арқылы мұздату және сублимация процесін жеделдетуге бағытталған, бірақ кезеңнің ұзақтығы 8 сағатқа дейін қысқартылды. Жылдам мұздату кептіру жылдамдығына оң әсер етуі мүмкін, бірақ төмен температурамен жеткілікті уақыт болмаған жағдайда бос су толығымен жойылмауы мүмкін. Екінші кезеңде -55°C температура, 0,05 мБар қысым, 10 сағат - байланысқан ылғалды тиімді түрде жояды, бірақ қарбыздағы қант пен органикалық қышқылдардың көптігіне байланысты кейбір сезімтал компоненттердің ыдырауына әкелді.

Қызанақтағы ылғалдың өзгеруінің нәтижелері 1-кестеде, ал қарбызда 2-кестеде көрсетілген.

1-кесте. Лиофильді кептіру процесінде қызанақ ұнтағының ылғалдылығының уақытқа байланысты өзгеруі

Уақыт ұзақтығы, сағат	**Лиофильді кептіру кезінде қызанақ ұнтағының ылғалдылығының өзгеруі**		
	Ылғалдылығы, W, %		
	нұсқа 1	нұсқа 2	нұсқа 3
12	55,3	45,5	35,9
14	30,7	36,5	28,6
16	25,4	27,7	22,5
18	17,1	20,6	13,3
20	14,9	11,5	7,41

1-кестеде келтірілген нәтижелерге сәйкес, ең жоғары тиімділік 3-нұсқада байқалды, себебі 12 сағат кептіргеннен кейін өнімнің ылғалдылығы 35,9% құрады, 1-нұсқада 55,3% және 2-нұсқада 45,5% болды.18-ші сағатқа қарай ұнтақтың ылғалдылығы 3-нұсқада 13,3% болды, 1 және 2-нұсқаларда сәйкесінше 17,1% және 20,6% болды. Максималды сусыздану кептірудің 20-шы сағатында байқалды: ең төменгі қалдық ылғалдылық 3-нұсқада 7,41% болды, бұл судың ең толық жойылуын көрсетеді.

2-нұсқадағы кептіру режимі қызанақ шикізатынан бос және байланысқан ылғалды кетіру үшін температура мен вакуум жағдайларының

ең тиімді үйлесімін көрсетті.100 г қызанақ сығындысынан алынған құрғақ зат мөлшері 4,966 г құрады, бұл қызанақ жемістеріндегі құрғақ заттың әдеттегі мөлшеріне сәйкес келеді.

2-кесте. Лиофильді кептіру процесінде қарбыз ұнтағының ылғалдылығының уақытқа байланысты өзгеруі

Уақыт ұзақтығы, сағат	Лиофильді кептіру кезінде қарбыз ұнтағының ылғалдылығының өзгеруі		
	Ылғалдылығы,W, %		
	нұсқа 1	нұсқа 2	нұсқа 3
27	46,8	54,2	65,7
29	40,6	41,8	43,9
31	35,2	33,5	24,1
33	29,8	21,7	12,5
35	20,4	13,7	9,3
37	14,2	10,4	4,7

Қарбыз ұнтағы үшін (2-кесте) ылғалды азайту динамикасы тұрақты төмен қалдық ылғалдылыққа қол жеткізу үшін көбірек уақыт қажет екенін көрсетеді, бұл негізінен қарбыз целлюлозасының су мөлшерінің жоғары болуына байланысты.3-нұсқа ең жоғары кептіру тиімділігін көрсетті: 33 сағат кептіргеннен кейін ылғалдылық 12,5%-ға дейін төмендеді, ал 37 сағаттан кейін 4,7%-ға жетті.

1- нұсқада 33 және 37 сағаттан кейінгі ылғалдылық сәйкесінше 29,8% және 14,2% болды, ал 2-нұсқада 21,7% және 10,4% болды. Бұл режимде 3-нұсқа (–40°C және –55°C, қысымның төмендеуі және кептіру уақыты жеткілікті) қарбыз ұнтағын тиімді түрде құрғатты.100 г қарбыз сығындысынан алынған құрғақ заттың мөлшері 3,132 г болды, бұл қызанақпен салыстырғанда қарбыздағы құрғақ заттың аз мөлшеріне сәйкес келеді.

Нәтижелер көрсеткендей, -40°C және -55°C температурада сатылы кептірумен 3-нұсқа қызанақ пен қарбыз үшін ең тиімді кептіру әдісі болды. Бұл әдіс бойынша қызанақ ұнтағының ылғалдылығы 18 сағат кептіргеннен кейін 13,3%-ға төмендеді, ал қарбыз ұнтағы үшін 33 сағат кептіргеннен кейін ылғалдылық 12,5%-ға жетті.

Мұздатып кептіру өнімнің құрылымын және органолептикалық қасиеттерін, соның ішінде түсін, дәмін және хош иісін сақтауға көмектесті, осылайша жоғары сапалы, антиоксиданттарға бай қызанақ ұнтағын өндіруді оңтайландырды.

Қызанақ және қарбыз ұнтақтарын инфрақызыл кептіру әдісімен алу технологиялық процесі.

Инфрақызыл кептіру арқылы жаңа піскен қызанақтарды алу әдісі, шикізатты ұсақтау және кептіру арқылы келесідей болды: қызанақтар тексеріліп, жуылып, сабақтары алынды. Инфрақызыл өңдеу және кептіру кезінде қызанақтардан ылғалды тиімді кетіру үшін қызанақтар сегіз тең тілімге кесілді.

Қызанақтарды осылай кесудің себебі, алюминий тағам табағына терісі жоғары қаратып қойылған кезде, тілімдер кептіру кезінде табаға жабысып қалмайды, бұл сұйықтықтың шырын камерасынан төменде орналасқан инфрақызыл қыздырғыштарға ағуына жол бермейді.

Тілімдер бір қабатқа біркелкі орналастырылып, арасы 0,5-1,5 см болды. Содан кейін таба кіріктірілген керамикалық инфрақызыл қыздырғыштары бар кептіру пешіне салынды. Қы-

занақтар инфрақызыл кептіргіште 45°С, 50°С және 60°С температурада ылғалдылық 10-12% жеткенше кептірілді.

Инфрақызыл сәулеленуді қолдана отырып, қарбыз ұнтағын алу әдісі, оның ішінде шикізатты ұнтақтау және кептіру келесідей жүзеге асырылды: қарбыздар тексеріліп, жуылып, аршылып, тұқымдары алынып, салмағы 0,014–0,022 кг болатын кесектерге кесілді. Содан кейін кесектер жалпақ пісіру парағына бір қабат етіп салынды.

Пісіру парағы кіріктірілген керамикалық инфрақызыл жылытқыштары бар кептіру пешіне қойылды. Инфрақызыл энергияны қолдана отырып, үш кептіру режимі зерттелді: қарбыздарды 40, 50 және 60°С температурада қыздыру.

Камерадағы жұмыс температурасы 40–60°С аралығында орнатылды, ал қызанақтар осы температурада 18,0–24,5 сағат ұсталды. Содан кейін камерадағы жұмыс температурасы 20–30°С дейін төмендетілді, ал қызанақтар осы температурада 2,5–3,0 сағат ұсталды.

Кептіргеннен кейін кептіру камерасынан алынып, қызанақтар ұнтақ алу үшін аналитикалық ұнтақтағышта ұнтақталды. Қыздырудың ең жоғары рұқсат етілген температурасы 60°С болып белгіленді, себебі бұл температурадан жоғары температура кептірілген қызанақтардың өзгеруін айтарлықтай арттырып, олардың сапасына кері әсер етті. Инфрақызыл кептіру нәтижеле

3-кесте. Инфрақызыл кептіру режимдері және ұнтақ ылғалдылығының өзгеруі

Көрсеткіштер	Зерттелген ұнтақтар					
	Қызанақ ұнтағы			Қарбыз ұнтағы		
Қыздыру температурасы, °С	40	50	60	40	50	60
Оптималды ылғалдылыққа жету уақыты, час	23	21	20	39	37	34
Ылғалдылық, %	12,4	13,6	13,1	13,9	13,6	13,4

Тәжірибелік деректерге сүйене отырып, қосымшадағы 3-кестеде көрсетілгендей, ылғалдылығы 10-13% болатын қызанақ және қарбыз ұнтақтарын алу үшін оңтайлы инфрақызыл кептіру температуралары анықталды. Әртүрлі температурадағы кептіру уақытын талдау, сондай-ақ дайын өнімнің органолептикалық қасиеттері мен сыртқы түрін зерттеу арқылы ұтымды процесс параметрлері белгіленді.

Қызанақ ұнтағы үшін кептіру уақыты қыздыру температурасының жоғарылауымен қысқарды: 40°С температурада кептіру уақыты 23 сағат, 50°С температурада 21 сағат және 60°С температурада 20 сағат болды.60°С температураны пайдалану органолептикалық қасиеттердің нашарлауына әкелген жоқ. Атап айтқанда, ұнтақтың түсі қанық, ашық қызыл болып қалды, табиғи реңкінің қараңғылануы немесе жоғалуы болмады. Өнімнің дәмі мен хош иісі тұрақты болды және кептірілген өсімдік материалдарына қойылатын сапа талаптарына сай болды. Бұл бақылаулар көрсеткендей, қызанақ шикізатын 60°С температурада кептіру оңтайлы болып саналады, себебі бұл температура органолептикалық қасиеттерді сақтай отырып және термиялық зақымдану белгілерін болдырмай, қысқа кептіру уақытын (20 сағат) қамтамасыз етеді.

Қызанақ ұнтағынан айырмашылығы, қарбыз ұнтағы үшін температураны 60°С-қа дейін көтеру өнім сапасына кері әсерін тигізді. Кептіру уақыты 40°С температурада 40 сағаттан 60°С температурада 34 сағатқа дейін қысқартылғанымен, максималды температурада ұнтақтың айтарлықтай қараюы байқалды, бұл шикізат компоненттерінің термиялық ыдырауының басталғанын көрсетеді. Түстің айтарлықтай жоғалуы және дәм мен хош иістің нашарлауы бұл температураны практикалық емес етеді. Қарбыз ұнтағы үшін ең қолайлы температура - 50°С, кептіру уақыты - 37 сағат. Бұл жағдайда органолеп-

тикалық қасиеттердің тұрақтылығы қамтамасыз етілді: ұнтақ өзінің табиғи түсін, хош иісін және дәмін сақтап қалды, бұл термиялық зақымдануды жоқтығын растайды.

Қызанақ ұнтағынан айырмашылығы, қарбыз ұнтағы үшін температураны 60°С-қа дейін көтеру өнім сапасына кері әсер етті. Сондықтан инфрақызыл кептіру үшін оңтайлы температура 60°С және қызанақ ұнтағы үшін 20 сағат кептіру уақыты, сапаны және қалдық ылғалдылықты 13,1% сақтайды. Қарбыз ұнтағы үшін оңтайлы температура 50°С және 37 сағат кептіру уақыты, ылғалдылық 13,4% сақталады және органолептикалық қасиеттерінің қараюын немесе жоғалуын көрсетпейді.

Инфрақызыл кептірудің басты артықшылығы - материалдан ылғалды тез және тиімді түрде кетіру мүмкіндігі, бұл биологиялық белсенді заттармен жұмыс істегенде маңызды. Инфрақызыл кептіру материалға терең енуді және ішінен қыздыру арқылы ылғалды тез кетіруді қамтиды. Жылуды беру үшін ауаны пайдаланатын дәстүрлі әдістерден айырмашылығы, инфрақызыл сәулелену өнімге тікелей әсер етеді, кептіру процесін жеделдетеді және с дәрумені, ликопин және басқа антиоксиданттар сияқты белсенді компоненттердің термиялық ыдырау қаупін азайтады.

Қызанақ және қарбыз ұнтақтарының органолептикалық және физика-химиялық параметрлерін зерттеу

Қызанақ және қарбыз ұнтақтарының органолептикалық және физика-химиялық параметрлері (4-кесте) -40°С және –55°С температурада мұздатып кептіру, сондай-ақ қарбыз ұнтағы үшін 60°С және қызанақ ұнтағы үшін 50°С температурада инфрақызыл кептіру арқылы зерттелді.

Қарбыз ұнтағының ылғалдылығы мұздатып кептіргеннен кейін 12,5%, ал қызанақ ұнтағынікі 13,3% болды; инфрақызыл кептіргеннен кейін 13,1%, ал қызанақ ұнтағынікі 13,4% болды.

4-кесте. Қарбыз бен қызанақ ұнтақтарының органолептикалық және физика-химиялық қасиеттері

Көрсеткіш атауы	**Зерттелетін ұнтақтар**			
	Арбуз ұнтағы		Қызанақ ұнтағы	
	Кептіру әдісі			
	лиофильді кептіру	Инфрақызыл кептіру	лиофильді кептіру	Инфрақызыл кептіру
Дәм және иіс	тәтті, қарбызға тән айқын дәмі және жағымды хош иіс		тәтті, қарбызға тән айқын дәмі және жағымды хош иіс	
Түс	ашық қызғылт-қызыл	айқын қызыл	ашық кызыл	қанық қызыл
Консистенция	ұнақ			
Ылғалдылық, %	12,5	13,1	13,3	13,4
Титрленетін қышқылдық, ^{0} Т	0,47	0,46	0,41	0,38
Белсенді қышқылдық, бірлік	5,2	5,1	4,4	4,3

Қарбыз ұнтағының мұздатып кептіргеннен және инфрақызыл кептіргеннен кейін титрленетін қышқылдығы 0,38-0,47 °Т аралығында, ал белсенді қышқылдығы 4,3–5,2 бірлік аралығын-

да болды.

Органолептикалық қасиеттері бойынша қызанақ пен қарбыз ұнтақтары ұнтақ тәрізді көрінді; Түсі ашық қызылдан ашық қызылға дейін болды; Иісі мен дәмі кептірілген қызанақ пен қарбызға тән болды, бөгде иістер болмады.

Физикалық-химиялық параметрлер бойынша қарбыз бен қызанақ ұнтақтары қолайлы шектерде болды. Нәтижелер 4-кестеде келтірілген.

Инфрақызыл кептіру тамақ және фармацевтика өнеркәсібінде көкөністер, жемістер, дәмдеуіштер және өсімдік сығындылары сияқты кептірілген өнімдерді өндіру үшін, сондай-ақ дәрідәрмектер мен косметика өндірісінде кеңінен қолданылады. Дегенмен, өнім сапасын сақтау үшін процестің параметрлерін мұқият бақылау маңызды: инфрақызыл сәулелену қарқындылығы, температура және кептіру уақыты, себебі шамадан тыс жоғары температура сезімтал заттарды бұзуы мүмкін.

Қызанақ пен қарбыз ұнтақтарының түсі зерттелді. Барлық үлгілер бір бастапқы материалдан алынды және таңдалған температура жағдайында мұздатып кептіру және инфрақызыл кептіру сияқты әртүрлі кептіру әдістері қолданылды. Түс сипаттамалары CIE Lab* жүйесін пайдалана отырып, Minolta CM-23d портативті спектрофотометрімен өлшенді, мұндағы L* жарықтық (0 = қара, 100 = ақ), a* - қызару дәрежесі және b* - сарғыштық дәрежесі.

Қызанақ пен қарбыз ұнтақтары үшін түс стандарттары қол жетімді болмағандықтан, бұл дақылдардың жаңа піскен жемістері салыстырмалы зерттеулер үшін бақылау үлгілері ретінде пайдаланылды. Зерттеу барысында әртүрлі кептіру режимдерінің, соның ішінде ауа ағынының әртүрлі жылдамдығымен 40, 50 және 60°C температурада инфрақызыл кептірудің, сондай-ақ әртүрлі температурада мұздатып кептірудің әсері зерттелді. Барлығы алты үлгі зерттелді:

-үлгі 1 - бақылау (жаңа томаттар);

-үлгі 2 - бақылау (жаңа қарбыз);

-үлгі 3 - инфрақызыл кептіру әдісімен алынған томат ұнтағы;

-үлгі 4 - лиофильді кептіру әдісімен алынған томат ұнтағы;

-үлгі 5 - инфрақызыл кептіру әдісімен алынған қарбыз ұнтағы;

-үлгі 6 - лиофильді кептіру әдісімен алынған қарбыз ұнтағы.

Өлшеулер әр үлгінің он нүктесінде кептіру процесінен кейін бірден жүргізілді, сонымен қатар түстің қанықтылығы (ΔC*) есептелді. Себебі кептірілген томаттардың түстік стандарты жоқ, бақылау үшін жаңа томаттардың параметрлері әдебиетте көрсетілген [9,10].

Түстің қанықтылығын растау үшін хроматичность немесе CIE LCh* жүйесі бойынша қанықтылықты есептеу қарастырылуы мүмкін, мұндағы хрома (C*) мына формуламен есептеледі:

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}^{*}$$

Түстің тұрақтылығы D65 стандартты жарықтандыруында бағаланды - күндізгі жарықты имитациялау, түс температурасы 6504K, «Ортаңғы солтүстік аспан» (CIE D65), бейтарап рең.

Қызанақ пен қарбыз ұнтақтарының түс сипаттамаларын салыстырмалы зерттеу әртүрлі кептіру әдістерін: инфрақызыл кептіру және лиофилизацияны қолдану арқылы жүргізілді. Түс қанықтылығын бағалау түс параметрлерінің кептіру әдісі мен процесінің жағдайларына тәуелділігін анықтауға бағытталған. Нәтижелер қосымшадағы 5-кестеде келтірілген.

5-кесте. Спектрофотометрде жүргізілген зерттеулердің нәтижелері

Ұнтақ үлгілері	**Спектофотометр көрсеткіштері**			
	L	*a*	*B*	түстің қанықтылығы C_{ab} ед.
Үлгі 1	38 ,12	19.21	18,74	720,21

Үлгі 2	34,11	18,87	16,91	642,02
Үлгі 3	41.17	30.19	34.03	2073,56
Үлгі 4	50.75	22.68	21.48	975,77
Үлгі 5	41.42	25.22	26.35	1330,37
Үлгі 6	58.45	20.35	21.35	869,94

Өлшеу әдісіндегідей, кептіру және температура режимдері режимді модификациялау сипаттамаларына айтарлықтай әсер етеді: режимде алынған ұнтақтар (лиофилизация) жоғары жарықтықпен және қызыл түстің қанықтылығымен (жоғары L* және a* мәндерімен) сипатталады, ал инфрақызыл сәулеленудің жоғары температурасында кептірілген ұнтақтарда индикаторлар төмендейді, ал b* компоненті артады, бұл сары-қызғылт сары түске ауысуға әкеледі.

Лиофильді және инфрақызыл кептіру арқылы алынған қызанақ ұнтақтарындағы ликопин мөлшерін өзгертуге болады, бұл өнімге әртүрлі әсер етеді. Зерттеу ең қанық түс инфрақызыл кептіру әдісімен алынған қызанақ ұнтағында (Cab = 2073,5) және инфрақызыл кептіру әдісімен алынған қарбыз ұнтағында (Cab = 1330,37) алынғанын анықтады.

Инфрақызыл кептіру мен мұздатып кептірудің үйлесімі жоғары сапалы қанықтылықты қамтамасыз етеді. Бұл пигмент қосылыстары жақсы сақталған. Сондай-ақ, ұнтақтарды алудың технологиялық процестері зерттелді және өнімдегі қанықтылықты сақтау және ликопинді сақтау үшін инфрақызыл кептіру таңдалды.

Қызанақ және қарбыз ұнтақтарының витаминдік құрамы зерттелді (Кесте 6).

6 - кесте. Ұнтақтардың (қарбыз және томат) витаминдік құрамы

Көрсеткіштердің атауы, өлшем бірлігі	**Ұнтақтар**		**Тәулік қажеттілік (мг)**
	қарбыз	қызанақ	
Витаминдер, мг/100 г			
B1	0,18±0,036	0,12±0,02	1,1-1,4
B2	0,07±0,029	0,38±0,16	1,1-1,6
B3	4,35±0,87	3,84±0,77	14-18
B5	0,32±0,058	1,92±0,35	5-7
B6	0,35±0,07	0,75±0,15	1,2-1,7
B9	0,010±0,002	0,035±0,007	0,4
C	84,12±1,09	133,05±1,46	0,075-0,1
A	1,44	88,36	0,7-0,9
E	-	17,13	15

Кесте 6 нәтижелеріне сәйкес томат ұнтағының құрамында (мг/100 г): A – 88,36; E – 17,13; B1 – 0,12; B2 – 0,38; B3 – 3,84; B5 – 1,92; B6 – 0,75; B9 – 0,035; ал қарбыз ұнтағы құрамында (мг/100 г) – A – 1,44; B1 – 0,18; B2 – 0,07; B3 – 4,35; B5 – 0,32; B6 – 0,35; B9 – 0,010. Ұнтақтардың витаминдік құрамын күнделікті тұтыну бойынша % есептелді. Қарбыз

ұнтағы күнделікті қажеттілікті қамтамасыз етеді (%): B1 – 16,4 %, B2 – 6,4 %, B3 – 31,1 %, B5 – 6,4 %, B6 – 2,1 %, B9 – 2,5 %, ал витамин А 100 % қамтиды; томат ұнтағы – B1 – 11 %, B2 – 34,5 %, B3 – 27,4 %, B5 – 38,4 %, B6 – 62,5 %, B9 – 8,75 %, ал витамин А және Е 100 % қамтиды. Витаминдер құрамын талдау және олардың күнделікті қажеттілікті қанағаттандыру қабілетіне сүйене отырып, мынадай қорытынды жасауға болады: томат және қарбыз ұнтақтары антиоксиданттық витаминдер (А, Е) және В тобының витаминдері, әсіресе В6, маңызды болып табылатын метаболизм және нерв жүйесі үшін жоғары витаминдік құндылығы бар функционалды өнімдер болып табылады.

Қорытынды. Зерттеу нәтижесінде лиофильді және инфрақызыл кептірудің оңтайлы режимдері ылғалдылықты, органолептикалық, физика-химиялық көрсеткіштерді және түсін сақтай отырып, қызанақ пен қарбыз ұнтағын алуға мүмкіндік беретіні анықталды. Лиофильді кептіру өнімнің құрылымын, дәмін және биологиялық белсенді заттарын максималды түрде сақтайды, ал инфрақызыл кептіру түс қанықтылығы жоғары өнімдерді тез алуға мүмкіндік береді.

Кептіру нәтижелеріне сәйкес, органолептикалық және физика-химиялық көрсеткіштер бойынша зерттеу нәтижелері келесідей: лиофильді кептіру режимінде температура –40°С және –55°С болды, ал инфрақызыл кептіру режимінде қарбыз ұнтағы үшін температура 60°С және қызанақ ұнтағы үшін 50°С тиімді болып таңдалды.

Лиофильді кептіру кезінде қарбыз ұнтағының ылғалдылығы 12,5%, ал қызанақ ұнтағының ылғалдылығы 13,3% болды; инфрақызыл кептіру кезінде қарбыз ұнтағы 13,1%, ал қызанақ ұнтағы 13,4% болды.

Ең қанық түс қызанақ ұнтағын (Cab = 2073.56) және қарбыз ұнтағын (Cab = 1330.37) инфрақызыл кептіру арқылы алынды. Қарбыз ұнтағын мұздатып кептіру және инфрақызыл кептіру кезінде титрленетін қышқылдық 0.38–0.47 °С аралығында, ал белсенді қышқылдық 4.3–5.2 бірлік аралығында болды. Органолептикалық көрсеткіштер бойынша, қызанақ және қарбыз ұнтақтары талапқа сай; түсі ашық қызылдан ашық қызылға дейін; иісі мен дәмі кептірілген қызанақ пен қарбызға тән, бөгде иістерсіз.

Бұл нәтижелер жоғары сапалы, дәрумендік құндылығы жоғары және органолептикалық қасиеттері бар функционалды ұнтақ өнімдерін алу үшін мұздатып кептіру және инфрақызыл кептіру әдістерінің тиімділігін растайды.

Қаржыландыру. *Материалдар BR22886613 «Инновациялық технологияларды дамыту» ғылыми-техникалық бағдарламасы аясында «Онкологиялық аурулардың алдын алу үшін құны төмен және жоғары сапа көрсеткіштерімен функционалды тағамдық қоспаларды өндіру технологиясын жасау» жобасы аясында дайындалған. Ауыл шаруашылығы министрлігінің 101 «Ғылыми зерттеулер мен іс-шараларды бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру» кіші бағдарламасы бойынша 267 «Білім мен ғылыми зерттеулердің қолжетімділігін арттыру» бюджеттік бағдарламасы бойынша ауыл шаруашылығы өсімдік шаруашылығы өнімдері мен шикізатын өңдеу және сақтау технологиялары»; Қазақстан Республикасы 2024-2026 жж.*

Әдебиеттер

1. Ribeiro D., Freitas M., Silva A. M. S., Carvalho F., Fernandes E. Antioxidant and pro-oxidant activities of carotenoids and their oxidation products// Food and Chemical Toxicology. -2018. -Vol.120. -P.681–699. DOI 10.1016/j.fct.2018.07.060.

2. Kulawik A., Cielecka-Piontek J., Zalewski P. The Importance of Antioxidant Activity for the Health-Promoting Effect of Lycopene// Nutrients. -2023. -Vol.15(17):3821. DOI 10.3390/nu15173821.

3. Bin-Jumah M. N., Nadeem M. S., Gilani S. J., Mubeen B., Ullah I., Alzarea S. I., Ghoneim M. M., Alshehri S., Al-Abbasi F. A., Kazmi I. Lycopene: A Natural Arsenal in the War against Oxidative Stress and Cardiovascular Diseases// Antioxidants. -2022. -Vol.11(2): 232. DOI 10.3390/antiox11020232.

4. Saini, R. K., Rengasamy, K. R. R., Mahomoodally, F. M., & Keum, Y.-S. Protective effects of lycopene in cancer, cardiovascular, and neurodegenerative diseases: An update on epidemiological and mechanistic perspectives// Pharmacological Research. -2020. -Vol.155: 104730. DOI 10.1016/j.phrs.2020.104730.

5. Antonuccio P., Micali A., Puzzolo D., Romeo C., Vermiglio G., Squadrito V., Freni J., Pallio G., Trichilo V., Righi M., Irrera N., Altavilla D., Squadrito F., MariniH. R., Minutoli L. Nutraceutical Effects of Lycopene in Experimental Varicocele: An “In Vivo” Model to Study Male Infertility// Nutrients. -2020. -Vol.12(5): 1536. DOI 10.3390/nu12051536.

6. Ni Y., Zhuge F., Nagashimada M., Nagata N., Xu L., Yamamoto S., Fuke N., Ushida Y., Suganuma H., Kaneko S., Ota T. Lycopene prevents the progression of lipotoxicity-induced nonalcoholic steatohepatitis by decreasing oxidative stress in mice// Free Radical Biology and Medicine. -2020. -Vol.152. -P.571-582. DOI 10.1016/j.freeradbiomed.2019.11.036.

7. Eslami E., Carpentieri S., Pataro G., Ferrari G. A Comprehensive Overview of Tomato Processing By-Product Valorization by Conventional Methods versus Emerging Technologies//Foods. -2022. -Vol.12(1): 166. DOI 10.3390/foods12010166.

8. Lado J., Zacarias J., Rodrigo M. J., Zacarías L. Visualization of Carotenoid-Storage Structures in Fruits by Transmission Electron Microscopy// Methods in Molecular Biology. -2020. -Vol.2083. -P. 235-244. DOI:10.1007/978-1-4939-9952-1_18.

9. Cucu T., Huvaere K., Van Den Bergh M.A., et al. A simple and fast HPLC method to determine lycopene in foods// Food Analytical Methods. -2012. -Vol.5. -P.1221-1228. DOI 10.1007/s12161-011-9354-6.

10. Khalid M., Saeed R., Bilal M., Iqbal H. M. N., Huang D. Biosynthesis and biomedical perspectives of carotenoids with special reference to human health-related applications// Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. -2019. -Vol.17. -P.399-407. DOI 10.1016/j.bcab.2018.11.027.

Авторлар туралы мәлімет

Жумалиева Г.Е. – техника ғылымдарының кандидаты, «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Алматы қаласы филиалы, Алматы, Казақстан, e-mail: guljan_7171@mail.ru;

Чоманов У.Ч. – т.ғ.д., «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Алматы қаласы филиалы, Алматы, Казақста, e-mail: chomanov@mail.ru;

Байзақова А.Б. - жаратылыстану ғылымдарының магистрі, ғылыми қызметкер «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Алматы қаласы филиалы, Алматы, Казақстан, e-mail: ainel0026@gmail.com;

Шоман А.К.- техника ғылымдарының магистрі, аға ғылыми қызметкер, «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Алматы қаласы филиалы, Алматы, Казақстан, e-mail: shoman_a@mail.ru.

Information about the authors

Zhumalieva G.E. - candidate of technical sciences, Almaty Branch of LLP “Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry”, Almaty, Kazakhstan, e-mail: guljan_7171@mail.ru;

Chomanov U.Ch. - doctor of technical sciences, Almaty Branch of LLP “Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry”, Almaty, Kazakhstan, e-mail: chomanov@mail.ru;

Baizakova A.B. - master of natural sciences, research fellow, Almaty Branch of LLP “Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry”, Almaty, Kazakhstan, e-mail: ainel0026@gmail.com;

Shoman A.K. - master of technical sciences, Almaty Branch of LLP “Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry”, Almaty, Kazakhstan, e-mail: shoman_a@mail.ru.

ҒТАМР 65.65.03 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1399**

МАҚСАРЫ МАЙЫ НЕГІЗІНДЕ ОРТАША ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ КАЛОРИЯЛЫ МАЙОНЕЗДІҢ РЕЦЕПТУРАСЫН ӘЗІРЛЕУ

М.Ч. Тултабаев, Н. Акжанов, А. Сәдуакас, А.С. Камали

«Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ҒЗИ» ЖШС, Астана, Қазақстан

Корреспондент-автор: shomanyli@mail.ru

Мақалада мақсары майы негізінде орташа және жоғары калориялы майонез рецептураларын әзірлеу және оларды ғылыми тұрғыдан негіздеу бойынша жүргізілген кешенді зерттеудің нәтижелері баяндалады. Зерттеудің өзектілігі тағам өнеркәсібіндегі жаңа үрдістермен, нақты айтуанда, жасанды қоспаларды қолданбай-ақ физиологиялық тұрғыдан құнды өсімдік майлары негізінде майлы эмульсиялық өнімдердің тағамдық және биологиялық құндылығын арттыру қажеттілігімен айқындалады. Негізгі май фазасы ретінде салқын сығымдау және өнеркәсіптік рафинация әдістерімен алынған, полиқанықпаған май қышқылдарына, әсіресе линол қышқылына бай мақсары майы пайдаланылды.

Зерттеу барысында мақсары майының май қышқылдық құрамы мен негізгі физика-химиялық көрсеткіштері талданып, оның жоғары сапасы, тотығуға төзімділігі және эмульсиялық тұздықтар өндірісінде қолдануға технологиялық жарамдылығы дәлелденді. Алынған нәтижелер негізінде май және су фазаларының әртүрлі арақатынасына ие орташа және жоғары калориялы майонез рецептуралары әзірленді. Майонез өндірудің технологиялық сұлбасы әзірленіп, ол тұрақты, микродисперсті эмульсияның қалыптасуын қамтамасыз ететіні көрсетілді.

Дайын өнімдердің физика-химиялық көрсеткіштері бойынша жүргізілген бағалау май мөлшерінің өзгеруі эмульсия тұрақтылығына теріс әсер етпейтінін анықтады. Барлық зерттелген үлгілерде эмульсия тұрақтылығының жоғары деңгейде сақталуы ұсынылған рецептуралардың технологиялық сенімділігін дәлелдейді. Сонымен қатар, микробиологиялық зерттеулер нәтижесінде барлық майонез үлгілерінің санитарлық-гигиеналық талаптарға толық сәйкес келетіні анықталды.

Жүргізілген зерттеулердің нәтижелері мақсары майын орташа және жоғары калориялы майонез өндірісінде қолданудың ғылыми және практикалық тұрғыдан негізді екенін, сондай-ақ әзірленген рецептураларды өнеркәсіптік деңгейде енгізуге болатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: майонез, калория, мақсары, физика-химиялық қасиеттер, микрбиологиялық қауіпсіздік.

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТА МАЙОНЕЗА СРЕДНЕЙ И ВЫСОКОЙ КАЛОРИЙНОСТИ НА ОСНОВЕ САФЛОРОВОГО МАСЛА

М.Ч. Тултабаев, Н. Акжанов, А. Сәдуакас, А.С. Камали

ТОО «Казахский НИИ перерабатывающей и пищевой промышленности», Астана, Казахстан, e-mail: shomanyli@mail.ru

В статье рассматривается результаты проведенного комплексного исследования по разработке и научному обоснованию рецептов майонеза средней и высокой калорийности на основе сафлорового масла. Актуальность исследования определяется современными тенденциями в пищевой промышленности, в частности необходимостью повышения пищевой и биологической ценности жирных эмульсионных продуктов на основе физиологически ценных растительных масел без применения искусственных добавок. В качестве основной масляной фазы использовалось сафлоровое масло, богатое полиненасыщенными жирными кислотами, особенно линолевой кислотой, полученное методами холодного отжима и промышленной рафинации.

В ходе работы были проанализированы жирнокислотный состав и основные физико-химические показатели сафлорового масла, доказаны его хорошее качество, устойчивость к окислению и технологическая пригодность для применения в производстве эмульсионных соусов. На основе полученных результатов разработаны рецептуры майонеза средней и высокой калорийности с разными соотношениями жировой и водной фаз. Разработана технологическая схема производства майонеза, которая обеспечивает образование устойчивой микродисперсной эмульсии.

Проведенная оценка по физико-химическим показателям готовых продуктов показала, что изменение количества масла не оказывает отрицательного влияния на стабильность эмульсии. Сохранение на высоком уровне стабильности эмульсии во всех исследованных образцах доказывает технологическую стабильность предложенных рецептур. Кроме того, в результате микробиологических анализов установлено, что все образцы майонеза полностью соответствуют санитарно-гигиеническим требованиям.

Результаты проведенных исследований показывают, что применение сафлорового масла в производстве майонеза средней и высокой калорийности является научно и практически обоснованным, а также созданные рецептуры могут быть внедрены на производственном уровне.

Ключевые слова: майонез, калорийность, сафлор, физико-химические свойства, микробиологическая безопасность.

DEVELOPMENT OF A RECIPE FOR MEDIUM AND HIGH CALORIE MAYONNAISE BASED ON SAFFLOWER OIL

M.Ch. Tultabayev✉, N. Akzhanov, A Saduakas, A.S. Kamali

«Kazakh research Institute of processing and food industry» LLP, Astana, Kazakhstan,
e-mail: shomanyli@mail.ru

The article presents the results of a comprehensive study on the development of medium and high-calorie mayonnaise recipes based on safflower oil and their scientific justification. The relevance of the study is determined by new trends in the food industry, the need to increase the nutritional and biological value of fatty emulsion products based on physiologically valuable vegetable oils without the use of artificial additives. Safflower oil, obtained by cold pressing and industrial refining methods, rich in polyunsaturated fatty acids, especially linoleic acid, was used as the main oil phase.

In the course of the study, the fatty acid composition and basic physico-chemical indicators of safflower oil were analyzed, and its high quality, oxidation resistance and technological suitability for use in the production of emulsion sauces were proved. Based on the results obtained, recipes for medium and high-calorie mayonnaise with different ratios of fat and water phases were developed. A technological scheme for the production of mayonnaise has been developed, and it has been shown that it provides the formation of a stable, microdisperse emulsion.

The assessment carried out according to the physico-chemical indicators of finished products revealed that changes in the amount of oil do not negatively affect the stability of the emulsion. Maintaining a high level of emulsion stability in all studied samples proves the technological reliability of the proposed formulations. In addition, as a result of microbiological studies, it was found that all mayonnaise samples fully comply with sanitary and hygienic requirements.

The results of the studies carried out indicate that the use of safflower oil in the production of medium and high-calorie mayonnaise is scientifically and practically justified, as well as that the developed recipes can be implemented at an industrial level.

Keywords: mayonnaise, caloric content, safflower, physico-chemical properties, microbiological safety.

Кіріспе. Майонез жоғары концентрациялы эмульсия ретінде қарастырылады, ол негізінен өсімдік майы, қышқылдандырғыш және жұмыртқа ұнтағынан тұрады және әлемдік тағам өнеркәсібінде жетекші орындардың бірін алады. De Menezes R. C. F. және әріптестері қазіргі таңда дәстүрлі жұмыртқа өнімдерін өсімдік компоненттерімен алмастыру, сондай-ақ рафинирленген майлардың орнына физиологиялық тұрғыдан құнды майларды қолдану тенденциясын атап көрсетеді. Әдеби шолу барысында инновациялық ингредиенттердің негізгі түрлері жүйелендірілген: рапс олеосомалары, чиа тұқымының майы, өсімдік камедилері, аквафаба, ақуыз изоляттары, өсімдік ұнтақтары. Сондай-ақ майонездің стандартты құрамы көрсетілген: шамамен 63 % май, 20 % су, 8 % тұрақтандырғыштар мен эмульгаторлар. Авторлар алмастырғыштардың реологиялық қасиеттері рецептура компоненттерінің қатынасына және өнімнің функционалды сипаттамаларына айтарлықтай әсер ететінін атап өткен [1].

Gao X. Және оның әріптестері өсімдік майының бір бөлігін тауық және үйрек жұмыртқасының сарысына алмастыру эмульсияны біртекті әрі кішкене бөлшекті етіп қалыптастыратынын, тұтқырлықты арттыратынын және майонездің түсін жақсартатынын көрсетті. Сонымен қоса, газ-хроматография, масс-спектрометрия әдістері үлгілердің дәмдік профильдері арасындағы айырмашылықтарды растады [2].

Технологиялық тұрғыдан тоқталсақ, Старовойтова К. В. және Терещук Л. В. майонез өндірісінде әртүрлі пішінді жұмыртқа өнімдерін қолданудың мән-жайын егжей-тегжейлі зерттеген. Олар фосфолипаза арқылы өңделген құрғақ сарының ең аз мөлшері жұмыртқаның жалпы құрамын азайтуға мүмкіндік беретінін, сонымен қатар өнімнің консистенциясы, эмульсияның тұрақтылығы және крем тәрізді құрылымы бұзылмайтынын көрсетті [3]. Karshenas M., Goli M. және Zamindar N. жұмыртқа сарысын арахис пен кунжут шротынан алынған сүтпен бөліп айырбастауды ұсынды. Зерттеу нәтижелері 50 % алмастырылған жағдайда эмульсияның микроқұрылымы мен май тамшыларының біртекті болатынын, ал 75–100 % алмастырылғанда реологиялық қасиеттердің нашарлайтынын көрсетті. Бұл зерттеулер өнімнің функционалды құндылығын арттыру және экономикалық тиімділікті қамтамасыз ету үшін басқа да ақуыз компоненттерін қолданудың мүмкіндігін дәлелдейді [4].

Майлы фазаның қалыптасуына және майонезді биологиялық активті заттармен байытуға ерекше назар аударылған. Омельяненко О. С. және әріптестері күнбағыс және өңделмеген қыша майларының 3:1 қатынасындағы рецептурасын әзірлеп, «Провансаль» майонезінің дәстүрлі органолептикалық қасиеттерін қалпына келтірді, май фазасының тотығуға төзімділігін арттырды және өнімді витаминдер мен фитонцидтермен байытты [5]. Дурягина А. В., сондай-ақ Горнич Е. А. және әріптестері майонезге сүт альбуминын енгізудің өнімнің биологиялық құндылығын арттыратынын, сонымен қатар органолептикалық және физико-химиялық көрсеткіштерге әсер етпейтінін көрсетті, бұл функционалды қоспалары бар жаңа рецептураларды әзірлеудің маңыздылығын дәлелдейді. Резниченко И. Ю. және әріптестері күнбағыс майының 10 % мөлшерінде амарант майымен ішінара алмастырылуы тұтқырлық пен эмульсия тұрақтылығын сақтауға, органолептикалық қасиеттерді оңтайландыруға және скваленнің мөлшері арқасында биологиялық құндылықты арттыруға мүмкіндік беретінін анықтады [6-8].

Майлы фазаны функционализациялауда мақсары майы маңызды рөл атқарады. Матеев Е. З. және әріптестері салқын сығымдау әдісімен алынған мақсары майының құрамында омега-6 май қышқылдарының (шамамен 80 % линолдық және γ- линолдық) басым екенін және қышқылдық, пероксидтік және анизидиндік көрсеткіштердің төмен екенін көрсетті, бұл оның жоғары сапасын және майонез өндірісінде қолдануда болашағы зор екенін дәлелдейді [9]. Teryokhina А. және әріптестері функционалды майонездерде май қышқылы профилін мақсатты түрде модельдеуге, эмульсия тұрақтылығын бұзбай жүзеге асыруға болатынын көрсетті [10]. Bredikhin S. A. және әріптестері май фазасының құра-

мының және гомогенизация режимдерінің өнімнің тұтқырлығы мен ағып кетуіне біршама әсер ететінін көрсетті [11], ал Gülen S. және әріптестері мақсары майын енгізу антирадикалды белсенділікті, жалпы фенол құрамын және тұтынушыға тартымдылықты арттыратынын, эмульсия тұрақтылығы мен микробиологиялық қауіпсіздіктің 6 ай бойы сақталатынын көрсетті [12]. Бұл мәліметтер орта мөлшердегі калориялы майонезді жақсартылған тұрақтылықпен және ұзартылған сақтау мерзімімен әзірлеуде мақсары майын қолданудың тиімділігін растайды.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу нысаны ретінде Қазақстан Республикасының Жамбыл облысында өсірілген мақсары (Carthamus tinctorius L.) майы өсімдігінің тұқымдары пайдаланылды. Мақсары майы «ҚазҚӨТӨ ҒЗИ» ЖШС функционалдық тағам және тағам концентраттары зертханасында бірінші суық сығымдау әдісімен алынды. Сонымен қатар, әртүрлі калориялық деңгейдегі майонез рецептураларын әзірлеу үшін өнеркәсіптік жолмен алынған рафинирленген, дезодорланған мақсары майы қолданылды.

Мақсары майы полиқанықпаған май қышқылдарының, әсіресе линол қышқылының (70 %-дан жоғары) жоғары мөлшерімен, сондай-ақ қышқылдық және пероксидтік мөлшерінің төмен мәндерімен сипатталады, бұл оның эмульсиялық тұздықтар, соның ішінде майонез өндірісінде қолдануға жоғары биологиялық және технологиялық жарамдылығын көрсетеді.

Қосымша ингредиенттер ретінде майонез рецептурасына құрғақ сүт, қыша ұнтағы, қант, ас тұзы, лимон шырыны, 80 %-дық сірке қышқылы және ауыз су енгізілді. Бұл компоненттердің нақты мөлшері әр рецептурада әртүрлі өзгеріп, өнімнің дәмдік, қышқылдық және құрылымдық сипаттамаларын реттеуге мүмкіндік береді

Физика-химиялық көрсеткіштерді анықтау келесі нормативтік құжаттарға сәйкес жүргізілді:

- МЕМСТ 31762-2012 «Тамақ өнімдері. Ақуыздың, майдың, ылғалдың, қышқылдық және пероксидтік санының массалық үлесін анықтау әдістері»;

- МЕМСТ ISO 3961-2020 «Жануар және өсімдік текті майлар мен тоңмайлар. Йод санын анықтау»;

- МЕМСТ 30418-96 «Өсімдік және жануар майлары. Май қышқылдық құрамын анықтау әдісі»;

- МЕМСТ 25555.0-82 «Тамақ өнімдері. Титрленетін қышқылдықты анықтау әдісі».

Нәтижелер және талқылау. Мақсары майы - құрамында полиқанықпаған май қышқылдарына бай бағалы өсімдік майы. Оның құрылымында негізгі май қышқылдары ретінде линол қышқылы (С18:2), олеин қышқылы (С18:1) және пальмитин қышқылы (С16:0) бар. Бұл май ағзаға қажетті алмастырылмайтын май қышқылдарының зор көзі болып табылады, жүрек-қан тамырлары жүйесінің қалыпты жұмысын қалыптастырады және холестерин деңгейін төмендетуге оң әсер береді. Сонымен қатар, мақсары майы тағамдық өндірістерде, соның ішінде майонез, салат сияқты дайын өнімдерді дайындауда кеңінен пайдаланылады, себебі оның дәмдік және құрылымдық қасиеттері жоғары (сур.1).



1-сурет. Мақсары майының май қышқылдарының құрамы

Диаграммада көрініп тұрғандай, мақсары майындағы май қышқылдарының үлесі айқын бөлінген. Линол қышқылы (С18:2) басымдыққа ие болып, май құрамының шамамен 70%-ын құрайды, бұл оның полиқанықпаған қасиетке

бай екенін және адам ағзасы үшін аса қажетті май қышқылы екенін көрсетеді. Олеин қышқылы (С18:1) шамамен 20% мөлшерде, бұл майға жақсы дәмдік қасиет береді және жүрек-қан тамырлары жүйесінің қызметіне оң әсерін тигізеді. Пальмитин қышқылы (С16:0) мен стеарин қышқылы (С18:0) кішкене мөлшерде - тиісінше 6-7% және 2-3% - кездеседі, олардың болуы майдың құрылымын тұрақтандыруға, эмульсиялық қасиеттерін жақсартуға ықпал етеді. Қалған қышқылдардың үлесі өте аз (<1%), бірақ олар да май сапасын арттырып және оның функционалдық қасиеттерін сақтауға көмектеседі.

Мақсары майының физико-химиялық сипаттамаларын зерттеу оның сапасына баға беріп, сақтау мерзімін анықтауға және тағамдық өнімдерде қолдану жолдарын айқындауға мүмкіндік береді.1-кестеде майдың негізгі физико-химиялық көрсеткіштері көрсетілген.

1-кесте. Мақсары майының физико-химиялық көрсеткіштері

Сипаттамалары	Өзгеру диапазоны	Эксперименталды мәндер
Салыстырмалы тығыздық	0,919 - 0,924	0,920
Шағылу көрсеткіші, 25°С	1,473 -1,476	1,474
Йод саны (г/100 г)	115 - 155	125
Қышқылдық саны (мг КОН/г)	0,78 - 5,76	1,87
Эфирлік саны (мг КОН/г)	-	194,6
Пероксидтік саны	≤10	9,3

Салыстырмалы тығыздық 0,919-0,924 аралығында болып, эксперименталды мәні 0,920 құрайды, бұл майдың стандартты өсімдік майларының тығыздық аралығына сәйкес екенін көрсетеді. Шағылу көрсеткіші 1,473-1,476 аралығында болып, 25°С-де 1,474 деп анықталды, бұл майдың жарықты сіңіру және оптикалық қасиеттерін сипаттайды. Йод саны 115-155 г/100 г аралықта болып, тәжірибелік мәні 125 г/100 г-ға тең, бұл майдың полиқанықпаған май қышқылдарының көп екенін көрсетеді. Қышқылдық саны 0,78–5,76 мг КОН/г аралығында өзгеріп, практикалық мәні 1,87 мг КОН/г болған, бұл майдың сапасының жоғары екенін және қышқылдық деңгейінің төмендігін білдіреді. Эфирлік саны 194,6 мг КОН/г құрап, май құрамындағы эфирлік қосылыстарды бағалауға мүмкіндік береді. Пероксидтік саны 10-ға дейін болып, тәжірибелік мәні 9,3 болған, бұл майдың тотығу процесіне төзімділігін көрсетеді.

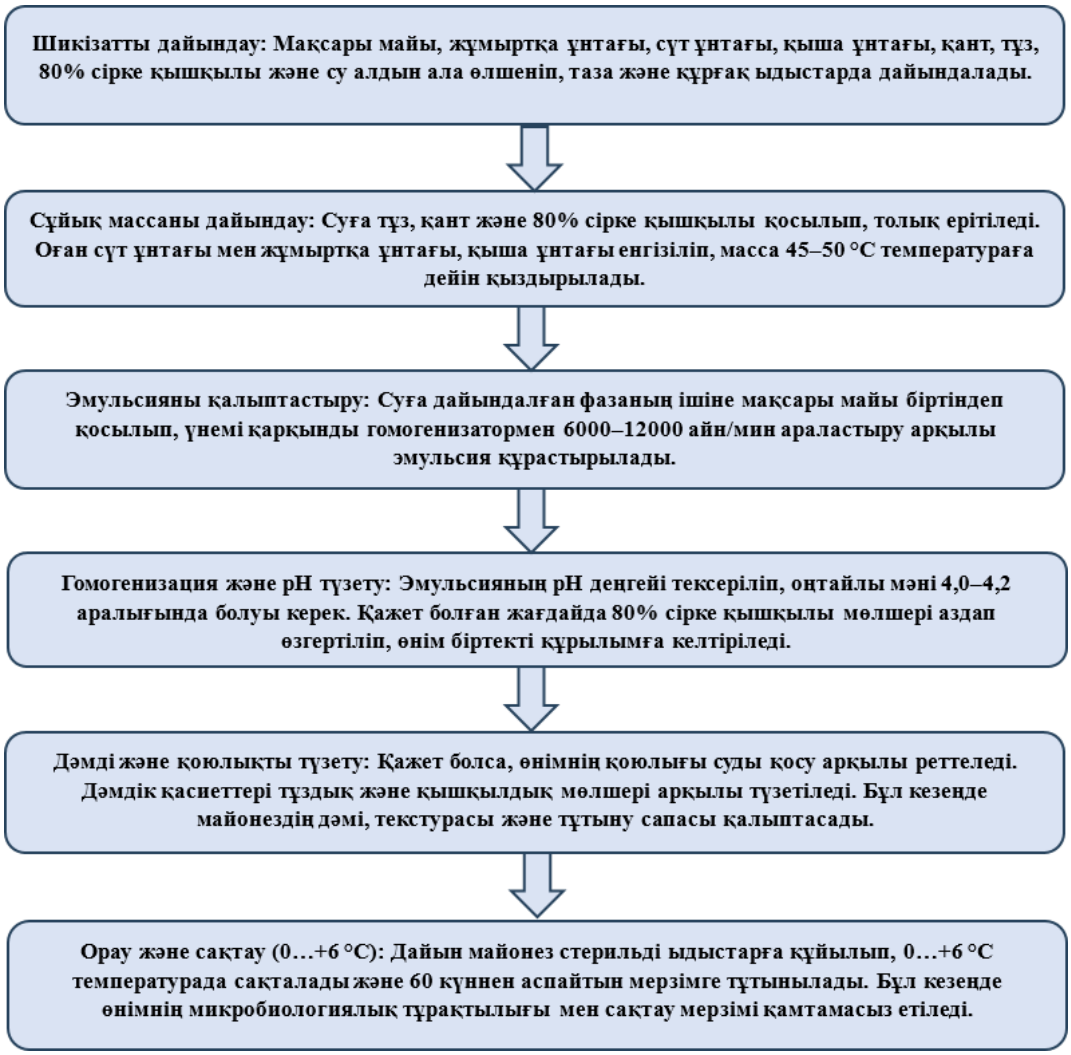
Жоғарыда сипатталған физико-химиялық қасиеттер негізінде майдың сапасы мен қоректік құндылығы анықталғаннан кейін майонез рецептураларының салыстырмалы құрамын көрсету маңызды.2-кестеде бақылау “3 желания” (күнбағыс майы), орташа калориялы және жоғары калориялы (мақсары майы) майонездердің ингредиенттік үлестері көрсетілген. Бұл мәліметтер әр рецептураның калориялылығын, май құрамын және су-құрғақ компонент қатынасын бағалауға мүмкіндік береді.

Кестеден көріп отырғанымыздай, бақыланатын майонезінде май мөлшері ең жоғары (65,4%), су мөлшері салыстырмалы түрде төмен (24,25%), бұл классикалық, қою құрылымды майонезді береді. Орташа калориялы майонез рецептурасында май мөлшері азайған (50,4%), ал су мөлшері ұлғайған (39,75%), бұл майонезді жеңіл және калориясы орташа етеді. Жоғары калориялы майонезде май мөлшері жоғарылап (65,4%), су мөлшері аз (23,75%), нәтижесінде дәмі күшті, қою құрылымды өнім алынған.

Осы сипаттамаларды ескере отырып, мақсары майы негізіндегі майонез үлгілерін алуға арналған технологиялық процесс әзірленді (сур.2).

2-кесте. Жоғары және орташа калориялы майонез рецептуралары

Ингредиент	Бақылау “3 желания майонезі” (күнбағыс майы) %	Орташа калориялы (мақсары майы) %	Жоғары калориялы (мақсары майы) %
Май	65,4	50,4	65,4
Жұмыртқа ұнтағы	5,0	5,0	5,0
Сүт ұнтағы	1,6	1,1	2,1
Қыша ұнтағы	1,05	1,05	1,05
Қант	1,05	1,05	1,05
Тұз	1,1	1,1	1,1
80% сірке қышқылы	0,55	0,55	0,55
Су	24,25	39,75	23,75



2-сурет. Мақсары майы негізіндегі майонез өндіру технологиясының кезеңдері

Ұсынып отырған технологиялық сызбада шикізатты дайындау, сұйық фазаны құрастыру, эмульсияны қалыптастыру, гомогенизация және pH түзету, дәмдік қасиеттерді реттеу, сондай-ақ дайын өнімді орау және сақтау сатылары жүйелі түрде бейнеленген. Бұл процестердің біркелкі орындалуы эмульсияның тұрақтылығын арттырып, майонездің біртекті құрылымын, қауіпсіздігін және жоғары сапалық көрсеткіштерін қамтамасыз етеді. Осы технология негізінде өндірістік жағдайда қолдануға және функционалдық өсімдік майлары негізіндегі жаңа өнімдер алуға бейімделген.

Дайын өнімдердің сапасын кешенді бағалау мақсатында бақыланатын және тәжірибелік майонез үлгілерінің негізгі физика-химиялық көрсеткіштері анықталды. Бұл көрсеткіштер рецептура құрамының эмульсия тұрақтылығына, ылғалдылыққа және қышқылдық деңгейіне әсерін ғылыми тұрғыдан сипаттайды.

3-кесте. Мақсары майы негізіндегі майонез үлгілерінің физика-химиялық көрсеткіштері

Көрсеткіш	Бақылау “3 желания” (күнбағыс майы)	Орташа калориялы (мақсары майы)	Жоғары калориялы (мақсары майы)
Май мөлшері, %	65,4	50,4	65,4
Ылғал және ұшқыш заттар массалық үлесі, %	24,3	39,8	23,8
Қышқылдылығы (сірке қышқылына шаққанда), %	0,7	0,8	0,6
Эмульсия тұрақтылығы	97	99	98

4-кесте. Дайын майонез үлгілерінің микробиологиялық көрсеткіштері

Көрсеткіш атауы	Көрсеткіштің реттелетін мәні	Бақылау “3 желания”	Орташа калориялы (мақсары майы)	Жоғары калориялы
МАжФАнМс, КТБ/см 3 (г), көп емес	≤ 5,0×10³	95,41	54,6	60,2
ІТТБ	0,1 г рұқсат етілмейді	анықталған жоқ	анықталған жоқ	анықталған жоқ
Ашытқылар мен саңырауқұлақ, КТБ/г	50 г көп емес	анықталған жоқ	анықталған жоқ	анықталған жоқ
Salmonella spp.	25 г аспауы тиіс	анықталған жоқ	анықталған жоқ	анықталған жоқ
Escherichia coli	1г аспауы тиіс	анықталған жоқ	анықталған жоқ	анықталған жоқ
Staphylococcus aureus	1 г аспауы тиіс	анықталған жоқ	анықталған жоқ	анықталған жоқ

Кесте деректерінен сүйенсек, орташа калориялы үлгіде май мөлшерінің төмендеуі ылғал үлесінің артуымен қатар жүреді, ал қышқылдылық пен эмульсия тұрақтылығы нормативтік шектерде сақталған. Барлық үлгілерде эмульсия тұрақтылығының 97–99 % деңгейінде бо-

луы майонез жүйелерінің жоғары дисперстік тұрақтылығын және ұсынылған рецептуралардың технологиялық тұрғыдан тиімді екенін айқындайды.

Дайындалған өнімдердің микробиологиялық қауіпсіздігі 4-кестеде сипатталған.

Кестеден қарасақ, барлық дайын майонез үлгілері - бақылау (“З желания”) және тәжірибелік (орташа және жоғары калориялы мақсары майы негізіндегі) - микробиологиялық қауіпсіздік талаптарына толық сәйкес келеді. МАжФАнМс көрсеткіші барлық үлгілерде ≤5,0×10³ КОЕ/г нормативінен төменгі деңгейде болып, әсіресе тәжірибелік үлгілерде (54,6-60,2 КОЕ/г) микробиологиялық тұрақтылықтың жоғары деңгейін көрсетеді, бұл майонездің өндірістік технологиясының сапалы екенін дәлелдейді. ІТТБ (БГКП), ашытқылар мен саңырауқұлақтар, сондай-ақ патогендік микроорганизмдер – Salmonella spp., Escherichia coli және Staphylococcus aureus барлық үлгілерде анықталмаған, яғни өнімдер санитарлық-гигиеналық нормаларға толық сай келеді. Бұл сипаттамалар мақсары майы негізіндегі жаңа рецептуралардың микробиологиялық тұрғыдан қауіпсіз және ұзақ мерзімге сақталуға жарамды екенін, сондай-ақ олардың санитарлық-гигиеналық стандарттармен үйлесетінін растайды. Сонымен қатар, тәжірибелік үлгілердегі төмен МАжФАнМс деңгейі өнімнің органолептикалық және физико-химиялық қасиеттерін сақтай отырып, ұзақ мерзімде тұрақтылығын қамтамасыз ететінін көрсетеді.

Зерттеу нәтижелері бойынша орташа калориялы және жоғары калориялы майонез үлгілері дайындалды. Орташа калориялы үлгідегі майонезде май мөлшері азайғандықтан су үлесі ұлғайған, ал жоғары калориялы үлгілерде май мөлшері жоғары болып, қою құрылымды өнім алынған. Микробиологиялық зерттеулер көрсеткендей, барлық үлгілер санитарлық-гигиеналық талаптарға сай келеді, эмульсия тұрақтылығы жоғары және физика-химиялық көрсеткіштері нормативтік шектерде сақталған.

Қорытынды. Мақсары майынан алынған орташа калориялы және жоғары калориялы майонез үлгілері маңызды полиқанықпаған май қышқылдарының мөлшерін көбейтеді, бұл өнімнің биологиялық құндылығын арттырады. Физика-химиялық және микробиологиялық көрсеткіштердің нормативтік стандартқа сәйкестігі, сондай-ақ эмульсиялардың тұрақтылығы мен біркелкілігі эксперименттік құрамдардың қауіпсіз, технологиялық тиімді және ұзақ мерзімді сақтауға жарамды екенін көрсетеді. Сондықтан мақсары майына негізделген ұсынылған рецепт өнеркәсіптік жағдайларда сенімді және функционалды майонез өндірісінде қолдану үшін болашағы мол екенін көрсетеді.

Қаржыландыру. *Жұмыс Қазақстан Республикасының Ауыл шаруашылығы министрлігі BR22886613 ”Мақсары майы негізінде функционалдық мақсаттағы тағам өнімдерінің жаңа түрлерінің технологияларын әзірлеу” тақырыбы бойынша ”Ауыл шаруашылығы өсімдік шаруашылығының өнімі мен шикізатын қайта өңдеу және сақтау жөніндегі инновациялық технологияларды әзірлеу” қаржыландыратын бағдарлама шеңберінде жүргізілді.*

Әдебиеттер

1. De Menezes R.C.F., et al. Plant-based mayonnaise: Trending ingredients for innovative products //International Journal of Gastronomy and Food Science. -2022. -Vol.30(9): 100599. DOI 10.1016/j.ijgfs.2022.100599.

2. Gao X., et al. Effect of adding different egg yolk oil on the flavor and physicochemical properties of mayonnaise//Food Chemistry. -2025. -Vol.477:143612. DOI 10.1016/j.foodchem.2025.143612.

3. Старовойтова К.В., Терещук Л.В. Разработка рецептур майонеза с учетом основных тенденций совершенствования ассортимента //Техника и технология пищевых производств. -2018. - Т.48(1). -С.91-98. DOI 10.21603/2074-9414-2018-1-91-98.

4. Karshenas M., Goli M., Zamindar N. Substitution of sesame and peanut defatted-meal milk with egg yolk and evaluation of the rheological and microstructural properties of low-cholesterol mayonnaise //Food Science and Technology International. -2019. -Vol.25(8). -P.633-641. DOI 10.1177/1082013219853931.

5. Омельяненко О.С. и др. Разработка жировой основы майонеза, состоящей из смеси растительных масел //Сборник трудов Российской национальной научно-практической интернет-конференции для обучающихся и молодых ученых 18-19 декабря 2019 г, Нижний Новгород -2020. -С.354-358.

6. Дурягина А. В. Разработка технологии майонеза с альбумином //Молодежь. Наука. Инновации. -2021. -С.230-233.

7. Резниченко И. Ю., Захватаева А. В., Рубан Н. Ю. Разработка и оценка качества майонезного соуса с использованием масла амаранта //Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». -2022. -№2 (52). -С.3-9. DOI 10.17586-2310-1164-2022-15-2-3-9.

8. Горнич Е. А. и др. Разработка технологии майонеза, обогащённого молочным сывороточным белком //Вестник АПК Верхневолжья. -2021. -№1(53). -С.64-70. DOI 10.35694/YARCX.2021.53.1.011.

9. Матеев Е. З. и др. Исследование состава сафлорового масла, полученного методом холодного прессования //Вестник Алматинского технологического университета. -2019. -№ 2. -С.15-24.

10. Teryokhina A., Zheltoukhova E., Kopylov M. Analysis of fatty acid composition of functional mayonnaise sauce with pumpkin products //BIO Web of Conferences. -2024. -Vol.103:00075. DOI 10.1051/bioconf/202410300075.

11. Bredikhin S.A., Martekha A.N., Andreev V.N. Research of the rheological properties of mayonnaise with adding pumpkin and rice oils to replace sunflower oil //Food Science and Technology. -2023. -Vol. 43: e67722. DOI https://doi.org/10.1590/fst.67722.

12. Gülen S., Günal-Köroğlu D., Turan S. Effects of cold-pressed oil additives in varying proportions: Physico-chemical characteristics of mayonnaises //Food Chemistry. -2025. –Vol.469: 142576. DOI 10.1016/j.foodchem.2024.142576.

References

1. De Menezes R.C.F., et al. Plant-based mayonnaise: Trending ingredients for innovative products //International Journal of Gastronomy and Food Science. -2022. -Vol.30(9): 100599. DOI 10.1016/j.ijgfs.2022.100599.

2. Gao X., et al. Effect of adding different egg yolk oil on the flavor and physicochemical properties of mayonnaise//Food Chemistry. -2025. -Vol.477:143612. DOI 10.1016/j.foodchem.2025.143612.

3. Starovojtova K.V., Tereshhuk L.V. Razrabotka receptur majoneza s uchetom osnovnyh tendencij sovershenstvovanija assortimenta //Tehnika i tehnologija pishhevyh proizvodstv. -2018. - T.48(1). -S.91-98. DOI 10.21603/2074-9414-2018-1-91-98. [in Russian]

4. Karshenas M., Goli M., Zamindar N. Substitution of sesame and peanut defatted-meal milk with egg yolk and evaluation of the rheological and microstructural properties of low-cholesterol mayonnaise //Food Science and Technology International. -2019. -Vol.25(8). -P.633-641. DOI 10.1177/1082013219853931.

5. Omel’ janenko O.S. i dr. Razrabotka zhirovoj osnovy majoneza, sostojashhej iz smesi rastitel’ nyh masel //Sbornik trudov Rossijskoj nacional’ noj nauchno-prakticheskoj internet-konferencii dlja obuchajushhihsja i molodyh uchenyh 18-19 dekabrja 2019 g, Nizhnij Novgorod -2020. -S. 354-358. [in Russian]

6. Durjagina A. V. Razrabotka tehnologii majoneza s al’ buminom //Molodezh’. Nauka. Innovacii. -2021. -S.230-233. [in Russian]

7. Reznichenko I. Ju., Zahvataeva A. V., Ruban N. Ju. Razrabotka i ocenka kachestva majoneznogo sousa s ispol’ zovaniem masla amaranta //Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv». -2022. -№2 (52). -S.3-9. DOI 10.17586-2310-1164-2022-15-2-3-9. [in Russian]

8. Gornich E. A. i dr. Razrabotka tehnologii majoneza, obogashhjonnogo molochnym syvorotochnym belkom //Vestnik APK Verhnevolzh’ ja. -2021. -№1(53). -S.64-70. DOI 10.35694/YARCX.2021.53.1.011. [in Russian]

9. Mateev E. Z. i dr. Issledovanie sostava saflorovogo masla, poluchennogo metodom holodnogo pressovanija //Vestnik Almatinskogo tehnologicheskogo universiteta. -2019. -№ 2. -S.15-24. [in Russian]

10. Teryokhina A., Zheltoukhova E., Kopylov M. Analysis of fatty acid composition of functional mayonnaise sauce with pumpkin products //BIO Web of Conferences. -2024. -Vol.103:00075. DOI 10.1051/bioconf/202410300075.

11. Bredikhin S.A., Martekha A.N., Andreev V.N. Research of the rheological properties of mayonnaise with adding pumpkin and rice oils to replace sunflower oil //Food Science and Technology. -2023. -Vol.43: e67722. DOI https://doi.org/10.1590/fst.67722.

12. Gülen S., Günal-Köroğlu D., Turan S. Effects of cold-pressed oil additives in varying proportions: Physico-chemical characteristics of mayonnaises //Food Chemistry. -2025. –Vol.469: 142576. DOI 10.1016/j.foodchem.2024.142576.

Авторлар туралы мәлімет

Тултабаев М.Ч - техника ғылымдарының докторы, «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Астана филиалы, Астана, Қазақстан, e-mail: shomanyli@mail.ru;

Акжанов Н. - PhD докторант, «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Астана филиалы, Астана, Қазақстан, e-mail: nurtore0308@gmail.com;

Садуакас А. - «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Астана филиалы, Астана, Қазақстан, e-mail: aykon96@mail.ru;

Камали А.С. - «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Астана филиалы, Астана,Қазақстан, e-mail: akerke.kamali@bk.ru;

Information about the authors

Tultabayev M.Ch.- Doctor of Technical Sciences, Astana branch of Kazakh research Institute of processing and food industry LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: shomanyli@mail.ru;

Akzhanov N.- PhD doctoral student, Astana branch of Kazakh research Institute of processing and food industry LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: nurtore0308@gmail.com;

Saduakas A.- Astana Branch of the Kazakh Research Institute of Processing and Food Industries, Astana, Kazakhstan, e-mail: aykon96@mail.ru;

Kamali A.S. - Astana Branch of the Kazakh Research Institute of Processing and Food Industries, Astana, Kazakhstan, e-mail: akerke.kamali@bk.ru.

ҒТАМР 65.63.33 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1414**

TECHNOLOGY FOR PRODUCING KURT FROM CAMEL MILK

B. Kalemshariv, R. Askar, A.K. Mustafayeva, M.T. Mursalykova, A.M. Shulenova
NCJSC «S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University», Kazakhstan
Corresponding-author: ayaulym.mustafa@mail.ru

The article is devoted to the preparation of kurut, a national dairy product made from camel milk. A technology has been developed for using plant raw materials to enrich national dairy products with vitamins. Camel milk from Southern Kazakhstan and rose hips from Eastern Kazakhstan were selected as research objects, with rose hips used as plant raw materials added to the finished curd mass in dried, powdered form. This is because the vitamin content in dried fruits and berries is preserved for a long period of time. Rose hips are rich in vitamins and are especially valuable as a primary source of ascorbic acid, containing ten times more than apples. Ascorbic acid plays a key biochemical and physiological role in the human body; it contributes to the normal development of connective tissues, stress resistance and normal immune function, and protects against viral and bacterial infections. Three samples of cow' s milk and three samples of camel' s milk were taken for the study, as well as a control sample and samples of cottage cheese enriched with 3% and 5% rosehip powder, and an analysis of the vitamin C enrichment level was carried out. The physicochemical, organoleptic and energy indicators of cottage cheese with added dry rosehip powder were calculated. The sample with 5% rosehip powder, which showed the best results, was recognised as optimal. The article is devoted to the preparation of kurut, a national dairy product made from camel milk. A technology has been developed for using plant raw materials to enrich national dairy products with vitamins. Camel milk from Southern Kazakhstan and rose hips from Eastern Kazakhstan were selected as research objects, with rose hips used as plant raw materials added to the finished curd mass in dried form. The vitamin C content in 100 g of the product was determined to be 11,754 ± 0,24%, protein-60,1, fat-3,1, carbohydrates-18,2, energy value-341,1 kcal.

Keywords: cow' s milk, camel milk, national product, kurt, vitamin C, rose hips.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА КУРТА ИЗ ВЕРБЛЮЖЬЕГО МОЛОКА

Б. Калемшарив, Р. Асқар, А.К. Мустафаева, М.Т. Мурсалыкова, А.М. Шуленова
НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина», Казахстан, e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru

Статья посвящена приготовлению национального молочного продукта-курута из верблюжьего молока. Разработана технология использования растительного сырья для обогащения национальных молочных продуктов витаминами. В качестве объектов исследования были выбраны верблюжье молоко из Южного Казахстана и шиповник из Восточного Казахстана, причем шиповник, используемый в качестве растительного сырья, добавлялся в готовую творожную массу в сушеном, порошкообразном виде. Это связано с тем, что содержание витаминов в сушеных фруктах и ягодах сохраняется в течение длительного периода времени. Шиповник богат витаминами, особенно ценен как основной источник аскорбиновой кислоты, содержащей в десять раз больше, чем яблоко. Аскорбиновая кислота играет ключевую биохимическую и физиологическую роль в организме человека; она способствует нормальному развитию соединительных тканей, стрессоустойчивости и нормальной иммунной функции организма, а также защищает от вирусных и бактериальных инфекций. Для исследования были взяты три образца коровьего молока и три образца верблюжьего молока, а также контрольный образец и образцы творога, обогащенного 3% и 5% порошком шиповника, и был проведен анализ уровня обогащения витамином С. Были рассчитаны физико-химические, органолептические и энергетические показатели творога с добавлением сухого порошка шиповника. Образец с 5% порошком шиповника, который показал лучшие результаты, был

признан оптимальным. Содержание витамина С в 100 г продукта было определено как 11,754 ± 0,24%, белок-60,1, жир-3,1, углевод-18,2, энергетическая ценность-341,1 ккал.

Ключевые слова: коровье молоко, верблюжье молоко, национальный продукт, курт, витамин С, шиповник.

ТҮЙЕ СҮТІНЕН ҚҰРТ ӨНІМІН ДАЙЫНДАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ

Б. Калемшарив, Р. Асқар, А.К. Мустафаева✉, М.Т. Мурсалыкова, А.М. Шуленова

«С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Қазақстан, e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru

Мақала түйе сүтінен ұлттық сүт өнімін-құртты дайындауға арналған.Ұлттық сүт өнімдерін дәрумендермен байыту мақсатында өсімдік тектес шикізаттар қолданудың технологиясы әзірленді. Зерттеу нысандары ретінде Оңтүстік Қазақстанда өсірілген түйе сүті және өсімдік шикізаты ретінде Шығыс Қазақстанда өсірілген итмұрын таңдап алынып, дайын болғаны сүзбе массасына құрғақ және ұнтақталған күйінде қосылды. Өйткені құрғақ күйде кептірілген жеміс-жидектердегі дәрумендердің мөлшері ұзақ уақыт аралығында сақталады. Итмұрын дәрумендерге бай, соның ішінде ең бірінші аскорбин қышқылының көзі ретінде құндылығы өте жоғары, алма жемісімен салыстырғанда 10 есе көп болады. Аскорбин қышқылы адам ағзасында негізгі биохимиялық және физиологиялық рөл атқарады, ол дәнекер тіндердің қалыпты дамуына, стресске төзімділікке, дененің қалыпты иммундық жағдайын қалыптастыруға, вирустық және бактериялық инфекциядан қорғауға ықпал етеді. Зерттеу жүргізу үшін сиыр сүтінің үш үлгісі, түйе сүтінің үш үлгісі алынып, бақылау үлгісі және 3%, 5% итмұрын ұнтағы қосылған құрт үлгілерінің С дәруменімен байытылу дәрежесі зерттелді. Зерттеу нәтижесінде құрғақ ұнтақталған итмұрын қосылған құрттың физика-химиялық көрсеткіштері, органолептикалық көрсеткіштері және энергетикалық құндылығы есептелді. Жоғары нәтиже көрсеткен 5% итмұрын ұнтағы қосылған үлгі оңтайлы деп тынылды.100 гр өнімдегі С дәруменнің мөлшері 11,754±0,24%, ақуыз-60,1, май-3,1, көмірсу-18,2, энергетикалық құндылығы-341,1 ккал болатындығы анықталды.

Түйін сөздер: сиыр сүті, түйе сүті, ұлттық өнім, құрт, С дәрумені, итмұрын.

Introduction. Currently, the global dairy market is actively developing, and the assortment of manufactured products is expanding day by day. However, due to the economic situation and changes in the international environment, new approaches and methods that ensure the production of high-quality products in the dairy production and processing sector are still being considered. One quarter of Kazakhstan is characterized as flat steppe, another quarter as foothill regions, while half of the country is considered desert and semi-desert areas where camel breeding plays a special role. As of the end of 2024, the number of camels in Kazakhstan exceeded 159,111 thousand, and there is a need to regulate industrial processing of camel milk into export-oriented products. For Kazakhstan, in order to further develop the sector, one of the main tasks at present is the industrial processing and production of camel milk, which is currently considered at a low level. The production of camel milk, as well as the preparation and consumption of products such as cheese and yogurt from it, has been growing significantly in recent years [1].

Camel milk differs from the milk of other agricultural animals in its chemical composition, nutritional and medicinal properties. Camel milk contains three times more vitamin C and ten times more iron than cow’s milk, as well as unsaturated fatty acids, B vitamins, and mineral substances. The average chemical composition of camel milk dry matter is 8.2%, fats-3.5%, proteins-2.9% (including casein-2.5%), carbohydrates-4.7%. Camel milk is also a rich source of calcium, phosphorus, and fat-soluble vitamins [2].

Known for its immune-forming, anti-inflammatory, apoptotic, and antidiabetic

properties, camel milk is considered a naturally beneficial food. Due to its high content of β-casein and various secreted antibodies, it is easily digestible and, compared to cow's milk, is capable of resisting bacteria and viruses. The β-casein in camel milk does not cause allergies and is well absorbed, as it is sensitive to gastrointestinal hydrolysis; therefore, due to the high level of β-casein, camel milk is beneficial to human health [3].

Kazakh national dishes represent a traditional diet formed over many centuries. The daily diet of nomads is very beneficial to health and is distinguished by hospitality and generosity unique to the Kazakh people. Based on the main ingredients in their composition, Kazakh national dishes are divided into four groups: flour-based dishes, cereal-based dishes, meat dishes, and dairy dishes.

Kurt is one of the Kazakh national products. It is produced by fermenting cow's, sheep's, or goat's milk with pure lactic acid streptococcal cultures, separating the whey from the curd, and then drying it.

Normalized milk with a fat mass fraction of 0.6% is pasteurized at a temperature of 80-85°C for 10-20 minutes and cooled to 32-34°C, after which 5% starter culture is added and the acidity during fermentation is brought to 75-76°T. Then the curd is heated to 38-42°C and held for 20-30 minutes to accelerate whey separation, the whey is removed, and the curd with a moisture content of 76-80% is pressed for 3-5 hours. If salted kurt is prepared, the curd is salted before drying. Then the kurt is shaped into pieces weighing 20-60 g and dried in special drying chambers at a temperature of 35-40°C. In the finished product, the mass fraction of fat should be at least 12%, moisture content 17%, salt content not exceeding 2.5%, and acidity not exceeding 400°T. The shelf life of fatty kurt does not exceed 3 months, while that of non-fat kurt does not exceed 9 months.

The national product kurt is divided into three types:

- salted, dried curd, to which salt is added and then shaped into balls or cylindrical forms and dried;

- boiled, dried curd, which is boiled for 2-3 hours and then shaped into balls or cylindrical forms and dried;

- boiled paste-like mashed kurt intended for adding to soups [4].

Rosehip (*Rosa canina L.)* grows in all regions of the world, including Europe, Africa, Central and Western Asia, and Russia, due to its non-selective nature regarding climate and soil requirements. In Kazakhstan, 25 species of rosehip are found, four of which are endemic. Rosehip occurs in the Eastern Kazakh Uplands, Karatau, and Western Tien Shan regions. They are perennial plants belonging to the Rosaceae family. *Rosa* has many species and varieties. Their fruits, in addition to ascorbic acid, contain vitamins P, B1, B2, A, K, and E, sugars, tannins, pectins, organic acids, flavonoids, pigments, and salts of iron, manganese, phosphorus, magnesium, and calcium [5].

Ascorbic acid in rosehip exists in reduced and oxidized forms. After entering the body, it participates in enzymatic processes, stimulates metabolism, increases resistance to infections, and enhances work capacity. Another medicinal property of rosehip is its effect on the blood coagulation system [6].

Vitamin C, or ascorbic acid, is one of the vitamins that performs important functions in various chemical reactions of cellular metabolism. A deficiency of vitamin C can lead to scurvy.

In addition, vitamin C deficiency may lead to infections, obesity, cardiovascular diseases, diabetes mellitus, bone diseases, and skin diseases [7].

Materials and methods. The research objects were camel milk, cow's milk, dried and powdered rosehip, and the finished product kurt. Experimental research work was carried out in the workshop "Experimental production for dairy processing".

Camel milk (Kyzylorda), cow's milk, and kurt product were selected as research objects. Each milk sample (200 ml) was aseptically collected into sterile plastic bottles with screw caps and immediately delivered to the laboratory in a refrigerated bag at a temperature of 4°C.

For the purpose of vitamin C enrichment, plant

raw material rosehip was selected. This is because the daily vitamin C intake for adult's ranges from 65 to 139 mg per day.

Research methods: determination of physicochemical parameters of milk, methods for determining moisture content and dry matter (GOST 17626-81), methods for determining acidity (GOST 3626-73), determination of the mass fraction of vitamin C (GOST 30627.2-98), as well as calculation of the energy value of the kurt product. In the laboratory of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, the moisture content and acidity of the finished product were determined. The vitamin C content in the finished product was studied in the laboratory of Almaty Technological University [8-10].

A tasting evaluation of the finished product was conducted. Ten tasters were invited for the tasting, and the organoleptic characteristics were evaluated. Six samples of the finished product were taken for the tasting.

Results and discussion. During the research, for the purpose of enrichment with vitamin C, formulations of the national fermented dairy product in six different variants (Table 1) and a technological scheme (Figure 1) were developed.

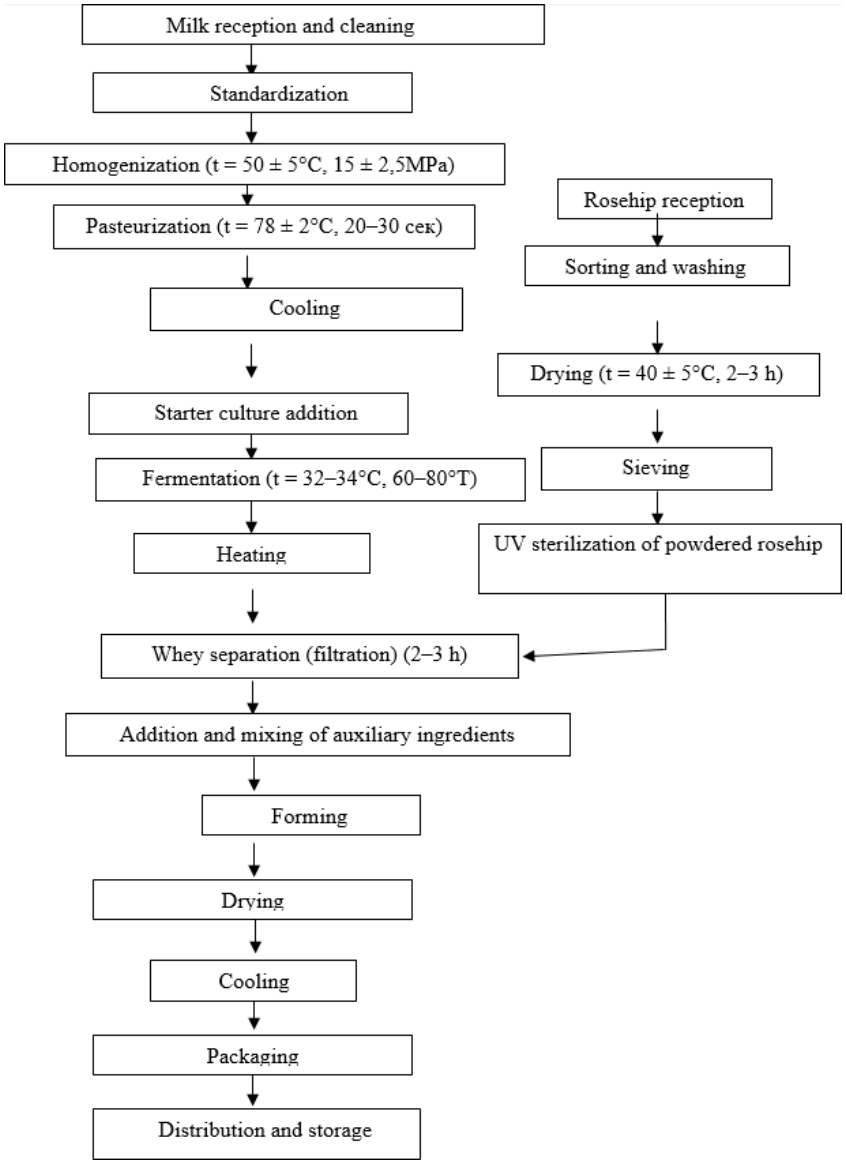


Fig.1 - Flow diagram of the production technology of kurt with the addition of dried powdered rosehip

Table 1 - Formulation of kurt with the addition of dried powdered rosehip (100 g)

Raw material name	Sample No.1	Sample No.2	Sample No.3	Sample No.4	Sample No.5	Sample No.6
Curd made from cow's milk	98	95	93	–	–	–
Curd made from camel milk	–	–	–	–	–	–
Dried powdered rosehip	–	3	5	98	95	93
Salt	2	2	2	2	3	5
Total	100	100	100	100	100	100

According to the organoleptic indicators, the best sample was selected depending on the level of vitamin C enrichment.

Figure 1 shows the technology of the national kurt product enriched with plant-based raw material rosehip.

Kurt should be stored at a temperature not exceeding 15°C and at a relative air humidity not exceeding 75%; fatty kurt should be stored for 1 month, and skimmed (defatted) kurt for 3 months. The physicochemical parameters of milk are presented in Table 2

Table 2 - Physicochemical parameters of milk

Parameters	Control sample (cow's milk)	Sample I (skimmed camel milk)
Acidity, °T	18	19
Fat, %	3,01	1,46
Dry matter, %	11,86	8,95
Solids-not-fat (SNF), %	10,41	8,85
Protein, %	3,33	3,30
Density, kg/m³	1031,28	1033,18

The evaluation of the organoleptic properties of kurt with the addition of dried powdered rosehip was carried out by assessing aroma, color, consistency, appearance, and taste. Table 3 presents the results of the tasting of the finished product, i.e., its organoleptic characteristics.

Table 3 - Organoleptic characteristics of kurt with the addition of dried powdered rosehip

Samples	Appearance and consistency	Taste and aroma	Color
Control sample (without additives)	Weight 2-60g, spherical. Irregular shapes, with grooves and rounded edges allowed. Hard and dry	Acidic and moderate	**Milky white**

Control sample (3% rosehip)	Weight 2-60g, spherical. Irregular shapes, with grooves and rounded edges allowed. Hard and dry	Acidic and moderate, slightly salty	**Yellowish**
Control sample (5% rosehip)	Weight 2-60g, spherical. Irregular shapes, with grooves and rounded edges allowed. Hard and dry	Acidic and moderate, slightly salty, rosehip taste not noticeable	**Light brown**
Kurt made from camel milk (without additives)	Weight 2-60g, spherical. Irregular shapes, with grooves and rounded edges allowed. Hard and dry	Acidic and moderate, slightly salty, rosehip taste weak	**White**
Kurt made from camel milk (3% rosehip)	Weight 2-60g, spherical. Irregular shapes, with grooves and rounded edges allowed. Hard and dry	Acidic and moderate, slightly salty	**Yellowish**
Kurt made from camel milk (5% dried rosehip)	Weight 2-60g, spherical. Irregular shapes, with grooves and rounded edges allowed. Hard and dry	Acidic and moderate, slightly salty, rosehip taste not noticeable	**Light brown**

The organoleptic properties were evaluated using a 5-point scale. In the overall score assessment, the kurt containing 5% dried powdered rosehip received the highest scores (4.9 and 4.89) (Figure 2). The control sample was rated 4,9 and 4,5 points for taste and aroma, while the kurt with 5% dried powdered rosehip received 4,7 and 4,7 points, respectively.

Based on organoleptic properties and vitamin C content, six samples were selected.

In 100 g of kurt with powdered rosehip, the fat content is 12,1 g, protein 53,2 g, carbohydrates 17,4 g, and its energy value is 391,3 kcal or 1637,2 kJ.

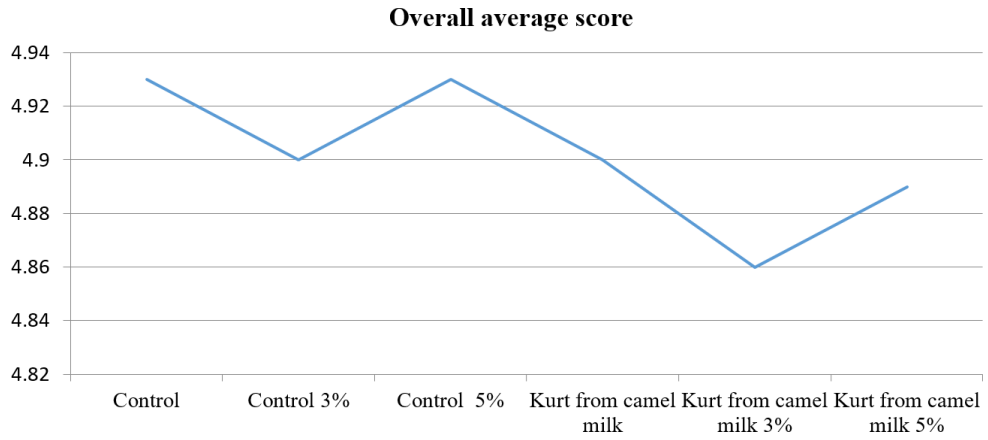


Fig.2 - Organoleptic score evaluation of kurt with the addition of dried powdered rosehip

Table 4 - Physicochemical parameters of kurt

Parameter	Control sample (without additives)	Control sample (5% rosehip)	Kurt from camel milk (5% rosehip)
Acidity, °T	320	330	350
Moisture content, %	15	17	17

In Table 4, the physicochemical parameters of the finished product were determined according to GOST 17626-81 and GOST 3626-73.

The content of vitamin C in 100 g of the finished product was determined using the colorimetric method according to GOST 30627.2-98 (Table 5).

Table 5 - Vitamin C content in 100 g of products

Sample	Vitamin C content, mg/100 g
Control sample (without additives)	1,13 ± 0,03
Control sample (5% rosehip)	8,125 ± 0,19
Kurt from camel milk (5% rosehip)	11,754 ± 0,24

Conclusion. Based on the results of the conducted research, the possibility of introducing dried powdered rosehip into production to preserve the quality of the finished product, enhance its nutritional value, and enrich it with vitamin C was studied. The technology for producing kurt with dried and powdered rosehip was developed. The physicochemical parameters of the kurt product were determined according to GOST 17626-81 and GOST 3626-73. The organoleptic characteristics, nutritional, and energy values of the finished product were evaluated. Based on the research results, the proposed national kurt product enriched with vitamin C can be considered a natural product recommended for general consumption.

Литература

1. Baiterek. Concept of development of agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan for 2021-2030 years.URL:https://baiterek.gov.kz/en/programs/concept-of-development-of-agro-industrial-complex-of-the-republic-of-kazakhstan-for-2021-2030-years. - Дата обращения: 18.12.2025.

2. Ali A.H., Abu-Jdayil B., Bamigbade G., Kamal-Eldin A., Hamed F., Huppertz T., Liu Sh-Q., Ayyash M. Properties of Low-Fat Cheddar Cheese Prepared from Bovine-Camel Milk Blends: Chemical Composition, Microstructure, Rheology and Volatile Compounds// Dairy Science. -2024. -Vol.107(5). - P.2706-2720. DOI 10.3168/jds.2023-23795.

3. Ali A.H., Li S., Liu Sh-Q., Gan R-Y, Li H-B, Kamal-Eldin A., Ayyash M. Invited Review: Camel Milk and Gut Health: Understanding Digestibility and the Impact on Gut Microbiota//Dairy Science. - 2024. -Vol.107(5). - P.2573-2585. DOI 10.3168/jds.2023-23995.

4. Итбалакова А.Б., Ребезев М.Б.Разработка технологии нового кисломолочного продукта с использованием микробиологического консорциума//Вестник АТУ. -2025. -Т.147(1). - С.106-114. DOI 10.48184/2304-568X-2025-1-106-114.

5. Алимарданова М.К., Петченко В.И., Елемесова А.А. Совершенствование технологии кисломолочных продуктов функционального назначения//Продукты питания: Производство, безопасность, качество. Международной научно-практической конференции. Башкирский ГАУ. -2019. -С.59-62.

6. Мустафаева А.К., Калемшарив Б, Жандауова А. Түйе сүтінен ұлттық сүтқышқылды өнімін өндіру технологиясын әзірлеу//Механика және технологиялар Ғылыми журнал. -2024. - №4 (86). -Б.9-16. DOI 10.55956/QKOR8581.

7. Sahingil D., Hayaloglu A.A. Enrichment of antioxidant activity, phenolic compounds, volatile composition and sensory properties of yogurt with rosehip (Rosa canina L.) fortification // International Journal of Gastronomy and Food Science. -2022.- Vol.28:100514. DOI 10.1016/j.ijgfs.2022.100514.

8. ГОСТ 17626-81. Казеин технический. Технические условия/Стандартинформ. -2008. -С.20.

9. ГОСТ 3626-73. Молоко и молочные продукты. Методы определения влаги и сухого вещества/Стандартинформ. -2009. -С.11.

10. ГОСТ 30627.2-98. Продукты молочные для детского питания. Методы измерений массовой доли витамина С (аскорбиновой кислоты)/ Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск. -2009. -С.8.

References

1. Baiterek. Concept of development of agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan for 2021-2030 years.URL: https://baiterek.gov.kz. - Date of address: 18.12.2025.

2. Ali A.H., Abu-Jdayil B., Bamigbade G., Kamal-Eldin A., Hamed F., Huppertz T., Liu Sh-Q., Ayyash M. Properties of Low-Fat Cheddar Cheese Prepared from Bovine-Camel Milk Blends: Chemical Composition, Microstructure, Rheology and Volatile Compounds// Dairy Science. -2024. -Vol.107(5). -P.2706-2720. DOI 10.3168/jds.2023-23795.

3. Ali A.H., Li S., Liu Sh-Q., Gan R-Y, Li H-B, Kamal-Eldin A., Ayyash M. Invited Review: Camel Milk and Gut Health: Understanding Digestibility and the Impact on Gut Microbiota//Dairy Science. - 2024. -Vol.107(5). - P.2573-2585. DOI 10.3168/jds.2023-23995.

4. Itbalakova A.B., Rebezev M.B. Razrabotka tehnologii novogo kislomolochnogo produkta s ispol’ zovaniem mikrobiologicheskogo konsorciuma//Vestnik ATU. -2025. -T.147(1). - S.106-114. DOI 10.48184/2304-568X-2025-1-106-114. [in Russian]

5. Alimardanova M.K., Petchenko V.I., Elemesova A.A. Sovershenstvovanie tehnologii kislomolochnyh produktov funkcional’ nogo naznachenija//Produkty pitanija: Proizvodstvo, bezopasnost’, kachestvo. Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Bashkirskij GAU. -2019. -S.59-62. [in Russian]

6. Mustafaeva A.K., Kalemshariv B, Zhandauova A. Tүje sүtinen ұlttyқ sүtқyshқyldy өnimin өndiru tehnologijasyn әzirleu//Mehanika zhәne tehnologijalar Ғylymi zhurnal. -2024. - №4 (86). -B.9-16. DOI 10.55956/QKOR858. [in Russian]

7. Sahingil D., Hayaloglu A.A. Enrichment of antioxidant activity, phenolic compounds, volatile composition and sensory properties of yogurt with rosehip (Rosa canina L.) fortification // International Journal of Gastronomy and Food Science. -2022.- Vol.28:100514. DOI 10.1016/j.ijgfs.2022.100514.

8. GOST 17626-81. Kazein tehnicheskij. Tehnicheskie uslovija/Standartinform. -2008. -S.20. [in Russian]

9. GOST 3626-73. Moloko i molochnye produkty. Metody opredelenija vlagi i suhogo veshhestva/Standartinform. -2009. -S.11. [in Russian]

10. GOST 30627.2-98. Produkty molochnye dlja detskogo pitanija. Metody izmerenij massovoj doli vitamina S (askorbinovoj kisloty)/ Mezhgosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii. Minsk. -2009. -S.8. [in Russian]

Information about the authors

Kalemshariv B.-Lecturer of the Department of Food Technology and Processing Products, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: begjan.ae@gmail.com;

Askar R. -student, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: raushan.askar@internet.ru;

Mustafayeva A.K.-Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru;

Mursalykova M.- PhD doctor, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: maigul_85@mail.ru;

Shulenova A. M.-Doctoral student, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: shulenovaa@mail.ru.

Сведения об авторах

Калемшарив Б.-преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет им. Сакена Сейфуллина, Астана, Казахстан, e-mail: begjan.ae@gmail.com;

Аскар Р.-студентка, Казахский агротехнический исследовательский университет им. Сакена Сейфуллина»,. Астана, Казахстан, email: raushan.askar@internet.ru;

Мустафаева А.К. -кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина, Астана, Казахстан, e-mail: ayaulym.mustafa@mail.ru;

Мурсалыкова М.Т.-доктор PhD,Казахский агротехнический исследовательский университет им. Сакена Сейфуллина, Астана, Казахстан, e-mail:maigul_85@mail.ru;

Шуленова А.М.-докторант, Казахский агротехнический исследовательский университет им. Сакена Сейфуллина, Астана, Казахстан,e-mail: shulenovaa@mail.ru.

ҒТАМР 65.09.03 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1414**

СОКСЛЕТ ӘДІСІ АРҚЫЛЫ ЮГЛОН АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖАСАУ ЖӘНЕ ӨНІМНІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ

[1]М.Ж Султанова, [3]У.З Сагындыков, [2]А.С. Сәдуақас, [1]М.А. Якияева, [2]А.С Камали, [3]Н. Акжанов

[1]Алматы технологиялық университеті АҚ, Алматы, Қазахстан,
[2]Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ҒЗИ» ЖШС, Астана, Қазақстан,
[3]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазахстан

Корреспондент-автор: nurtore0308@gmail.com

Мақалада грек жаңғағының (Juglans regia L.) жасыл қабығы мен қабығы биологиялық белсенді заттардың мол көзі ретінде зерттелді. Зерттеудің негізгі мақсаты – юглон (5-гидрокси-1,4-нафтохинон), яғни табиғи химиялық қосылыстың концентрациясын бағалау, сондай-ақ олардың экстракциялық шығымын арттыруға бағытталған тиімді технологияны әзірлеу болып табылды. Жалпы шикізат Алматы облысында жемістердің нағыз физиологиялық піскен кезеңінде жиналып, ≤ 45 °C температурада кептіріліп, герметикалық қара контейнерлерде сақталды. Дайындау кезеңі екі сатылы ұнтақтауды қамтыды, гранулометриялық стандарттау арқылы «қатты фазаның – еріткішпен» беткі ауданы жоғары деңгейге жеткізілді, бұл экстракция тиімділігін арттыруға мүмкіндік берді.

Биологиялық белсенді қосылыстарды экстракциялау Сокслет әдісімен, «АСВ-6» жартылай автоматтандырылған аппаратында жүргізілді. Процесс 40–80 °C аралығында орындалып, экстракт вакуумдық жағдайда ≤ 40 °C температурада концертрация жүргізілді. Юглон мөлшері жоғары тиімділікпен сұйықтық хроматографиясы (ЖТШХ) әдісімен анықталды, ал әртүрлі шикізат фракцияларынан алынған шығымның нақты мәндері калибреу қисығы негізінде есептелді.

Зерттеу нәтижелер көрсеткендей, жасыл қабық юглонның ең бай көзі болып, қабыққа қарағанда оның антиоксиданттық белсенділігі айтарлықтай жоғары болып саналды. Юглонның шығымы бөлшектердің өлшеміне, экстракция температурасына және уақытқа байланысты ауысты. Алынған тәжірибелік деректер жаңғақ қалдықтарын биологиялық белсенді заттар көзі ретінде тиімді пайдалануға, сондай-ақ фармацевтика, косметика салаларында, функционалды тағам және қайта өңдеу өндірісінде қолдануға нақты ғылыми негіз бола алады.

Зерттеу нәтижелері юглонның экстракциялық технологиясын жетілдіруге және алынған экстрактің тұрақтылығы мен биологиялық белсенділігін сақтап тұруға мүмкіндік береді. Алынған деректер жаңа биобелсенді өнімдер әзірлеу және өндірістік ауқымда қолдану үшін маңызды практикалық және ғылыми мәнге ие болып келеді.

Түйін сөздер: грек жаңғағы, юглон, экстракт, технология, Juglans regia L., биологиялық белсенді қосылыс, жасыл қабық.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЮГЛОНА МЕТОДОМ СОКСЛЕТА И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДУКЦИИ

[1]М.Ж. Султанова, [3]У.З. Сагындыков, [2]А.С. Сәдуақас, [1]М.А Якияева, [2]А.С. Камали, [3]Н. Акжанов

[1]АО Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан,
[2]Казахский научно - исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности, Астана, Казахстан,
[3]Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан,
e-mail: nurtore0308@gmail.com

В статье грецкий орех (Juglans regia L.) зеленая кожура и скорлупа были изучены как обильные источники биологически активных веществ. Основной целью исследования являлась оценка концентрации юглона (5-гидрокси-1,4-нафтохинона), то есть природного химического соединения, а

также разработка эффективной технологии, направленной на повышение их экстракционного выхода. Общее сырье собирали в Алматинской области в период истинной физиологической спелости плодов, сушили при температуре ≤ 45 °С и хранили в герметичных черных контейнерах. Этап подготовки включал двухступенчатое измельчение, при гранулометрической стандартизации площадь поверхности «твердой фазы – растворителем» была доведена до высокого уровня, что позволило повысить эффективность экстракции.

Экстракция биологически активных соединений производилась методом Сокслета на полуавтоматическом аппарате ”АСВ-6”. Процесс выполнялся при температуре от 40 до 80 °С, а экстракция проводилась при температуре ≤ 40 °С в вакуумных условиях. Содержание юглона определяли методом жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с высокой эффективностью, а фактические значения расхода от различных сырьевых фракций рассчитывали на основе кривой калибровки.

Исследование показало, что зеленая оболочка была самым богатым источником юглона и считалась значительно более антиоксидантной активностью, чем кора. Выход юглона менялся в зависимости от размера частиц, температуры экстракции и времени. Полученные экспериментальные данные могут служить реальной научной основой для эффективного использования отходов грецкого ореха в качестве источника биологически активных веществ, а также для использования в фармацевтической, косметической промышленности, в производстве функциональных продуктов питания и переработки.

Результаты исследования позволят усовершенствовать технологию экстракции юглона и сохранить стабильность и биологическую активность полученного экстракта. Полученные данные приобретают важное практическое и научное значение для разработки и применения новых биоактивных продуктов в промышленных масштабах.

Ключевые слова: грецкий орех, юглон, экстракт, технология, Juglans regia L., биологически активное соединение, зеленая оболочка.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF JUGLON BY THE SOXLET METHOD AND ASSESSMENT OF PRODUCT SUSTAINABILITY

[1]M.Zh. Sultanova, [3]U.Z. Sagyndykov, [2]A.S. Saduakas, [1]M.A. Yakiyaeva, [2]A.S. Kamali, [3]N. Akzhanov
[1]Almaty Technological University JSC, Almaty, Kazakhstan,
[2]Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry, Astana, Kazakhstan,
[3]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
e-mail: nurtore0308@gmail.com

Walnut (Juglans regia L.) green peel and shell have been studied as abundant sources of biologically active substances. The main purpose of the study was to evaluate the concentration of juglon (5-hydroxy-1,4-naphthoquinone), a natural chemical compound, as well as to develop an effective technology aimed at increasing their extraction yield. The total raw materials were collected in the Almaty region during the period of true physiological ripeness of the fruits, dried at a temperature of 45 ° C and stored in airtight black containers. The preparation stage included two–stage grinding, with granulometric standardization, the surface area of the ”solid phase - solvent” was brought to a high level, which increased the extraction efficiency.

The extraction of biologically active compounds was carried out by the Soxlet method on a semi-automatic device ”ASV-6”. The process was carried out at a temperature of 40 to 80 °C, and the extraction was carried out at a temperature of 40 °C under vacuum conditions. The yuglon content was determined by liquid chromatography (HPLC) with high efficiency, and the actual flow rates from various raw material fractions were calculated based on the calibration curve.

The study showed that the green shell was the richest source of juglon and was considered to have significantly more antioxidant activity than the bark. The yield of yuglon varied depending on the particle

size, extraction temperature, and time. The experimental data obtained can serve as a real scientific basis for the effective use of walnut waste as a source of biologically active substances, as well as for use in the pharmaceutical, cosmetic, and functional food production and processing industries.

The results of the study will make it possible to improve the technology of yuglon extraction and maintain the stability and biological activity of the resulting extract. The data obtained acquire important practical and scientific significance for the development and application of new bioactive products on an industrial scale.

Keywords: walnut, juglon, extract, technology, Juglans regia L., biologically active compound, green shell.

Кіріспе. Juglans mandshurica ағаштарының қалдықтары биологиялық белсенді қосылыстардың, атап айтқанда юглонның әлеуетті көзі болып табылады. Li C. және оның әріптестері осы қалдық бұтақтардан юглонды бөліп алу мақсатында «су майда» (MBMAE) микроэмульсиясына негізделген микротолқынды экстракция әдісін ұсынды. Массалық қатынасы 27:13,5:4,5:55 болатын микроэмульсия құрамын (Твин 80, n-пропанол, n-гексан және су) pH 5,6 және 40 °C температурада жетілдіру арқылы қосылысты 63 секунд ішінде тиімді алу мүмкіндігі қамтамасыз етілді. Юглонның шығымы 4,58 мг/г болды, бұл дәстүрлі экстракция әдістеріне қарағанда 1,86–6,65 есе жоғары тиімділікті көрсетті. Осыған ұқсас тиімділіктің артуы Ramezani N. және әріптестері жүргізген зерттеуде де байқалды, онда суперкритикалық CO_2-экстракция этанолды қос еріткіш ретінде колданылып жүзеге асырылды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, қысым бөлінген юглон мөлшерін анықтайтын негізгі фактор болып шықты, ал температураның көтерілуі және бөлшек өлшемінің ұлғаюы шығымды төмендеткенін жазған. Ең көп юглон шығымы 37,26 мг деңгейінде тіркелді, бұл 150 бар қысым, 35 °C температура және бөлшек өлшемі 375 мкм болған жағдайда алынды. Бұл деректер суперкритикалық экстракцияның зертханалық жағдайда және өндірістік қолданудағы практикалық маңыздылығын көрсетеді [1,2].

Сонымен қатар зерттеушілер грек жаңғағының әртүрлі бөліктеріндегі фенолды қосылыстар мен антиоксиданттық белсенділікке назар аударды. Jahanban-Esfahlan A. және әріптестері көрсеткендей, қабық, тұқым қабығы және жапырақтар фенолдармен қанық және жоғары антиоксиданттық автивтілікке ие, тіпті дәстүрлі түрде қоректік құндылық тек жаңғақ ядросымен байланысты болғанымен, Luksiene J. және әріптестері жемістердің орталық перделері фенолды қосылыстар мен проантоцианидиндердің зор көзі екенін көрсетті: фенолдардың жалпы мөлшері құрғақ массаның 1 грамында 131,55-тен 530,92 мг галлов қышқылы эквивалентінде, ал проантоцианидиндер - 1,14-тен 7,65 мг (-)-эпикатехин эквивалентінде өзгерді. Биоактивті қосылыстардың ең жоғары концентрациясы Шяуляй үлгісінде тіркелді, бұл олардың табиғи нутрицевтикалық және антиоксиданттық өнімдер өндірісінде жоғары мүмкіндігін растайды [3,4].

Ғалымдар жапырақтар мен Juglans гибридтеріне, мысалы, Juglans major 209 × Juglans regia, фенолдардың айқын антиоксиданттық белсенділікке ие көзі ретінде қызығушылық танытты. Fernández-Agulló A. және әріптестері көрсеткендей, экстракцияның оңтайды жағдайлары (75 °C, 120 мин, 50 % этанол) 30,17 % шығыммен экстракт алуға мүмкіндік беріп, құрамында кверцетин 3-β-D-глюкозид, неохлороген қышқылы және хлороген қышқылы анықталды. Сонымен қоса, Pop A. және әріптестері Juglans regia L. ерлер гүлдерін ультрадыбыстық экстракция арқылы зерттеп, ацетонның полифенолдар мен токоферолдарды алу үшін ең тиімді еріткіш екенін анықтады. Алынған экстрактар жоғары антиоксиданттық белсенділікті көрсетті, α-глюкозидаза және тирозиназа ферменттік белсенділігін тежеді, сонымен қатар жасушаларға зиян келтірмей қатерлі ісікке қарсы төтеп берді [5,6].

Грек жаңғағының қабығы агроөнеркәсіптік

қалдық ретінде кең таралған, сондай-ақ биологиялық белсенді қосылыстардың көзі болып табылады. Seabra I. J. және әріптестері жоғары қысым кезінде екі сатылы экстракция қолданды: алдымен суперкритикалық CO_2, содан кейін субкритикалық CO_2/этанол/су қоспасы температурасы 35–45 °C және қысымы 10–30 МПа болатын жағдайда зерттеген. ГХ-МС талдау алкандарды, терпеноидтарды және алкалоидтарды анықтады, ал юглон мен 1,4-нафтохинонның мөлшері 0,33-тен 2,77 мг/г диапазонында болды. Екінші сатыдағы экстракциядағы фенолдардың жалпы деңгейі 71,5–116,8 мг GAE/г құрады. Юглон мөлшеріне қарамастан экстрактардың жоғары антиоксиданттық белсенділігі жоғары қысым тәсілдерінің фармацевтика, ауыл шаруашылығы және тамақ өнеркәсібі үшін селективті және биологиялық құнды экстракттар алу мүмкіндігін растайды [7].

Грек жаңғағының (Juglans spp.) әртүрлі бөліктерінен биологиялық белсенді қосылыстарды экстракциялау зерттеушілердің қызығушылығын оятты, өйткені оларда фенолды қосылыстар, флавоноидтар және юглон көп мөлшерде кездеседі, және олар антиоксиданттық, микробқа қарсы және цитотоксикалық қасиеттерге ие. Мысалы, Rajković K. M. зерттеуінде Juglans nigra жапырақтарынан 50 % этанол және еріткіш/шикізат қатынасы 20 кг/кг қолдану арқылы экстракцияның оңтайлы жағдайлары фенолды қосылыстардың, соның ішінде 3-O-кофеоилхин қышқылы, кверцетин-3-O-галактозид және кверцетин-3-O-рамнозидтің жоғары шығымын қамтамасыз еткені, сондай-ақ макро- және микроэлементтердің сақталғаны көрсетілді [8]. Zhang Y. G. зерттеулерінде жеміс перделері, қабық және гүлдердегі фенолды қосылыстар анықталып, 50 қосылысты тіркеді; қабықта ең көп таниндер болғаны анықталса, ал антиоксиданттық белсенділік әсіресе жоғары болды, бұл осы бөліктерді функционалды өнімдер өндіруде қолданудың перспективалы екенін растайды [9]. Rusu M. E. көрсеткендей, жеміс перделері полифенолды қосылыстар мен конденсацияланған таниндерге бай, ал тирозиназа ингибиторлық тесттері олардың тағамдық, фармацевтикалық және косметикалық өнеркәсіп үшін құндылығын дәлелдеді [10].

Juglans regia жапырақтары да құнды биологиялық белсенді қосылыстардың көзі болып табылады. Cordova I. W. суда ерітетін эвтектикалық еріткіштерді пайдалану арқылы экстракцияның экологиялық таза әдісін жасап, жоғары фенол шығымын қамтамасыз етіп, айқын антиоксиданттық және микробқа қарсы белсенділікті көрсетті [11]. Paşayeva L. көрсеткендей, жапырақтар мен жасыл қабық антихолинэстераза белсенділігіне, антиоксиданттық және цитотоксикалық қасиеттерге ие, ал негізгі белсенді компоненттер ретінде эллаг қышқылы мен хлорроген қышқылы табылды [12]. Julia B. зерттеуінде жеміс пелликулдарын ультрадыбыстық өңдеу полифенолды қосылыстар мен дубильді заттардың шығымын арттырған, алайда өңдеу параметрлері әрбір сұрыпқа мұқият таңдалуы тиіс; мысалы, Valentina’ s Gift сұрыбы үшін оптималды жағдайлар биологиялық белсенді заттардың көп мөлшердегі шығымын қамтамасыз етті [13]. Осы деректердің жиынтығы Juglans ағаштарының әртүрлі бөліктерінен айқын биологиялық белсенділігі бар экстракттер алуға және оларды тағам, қайта өңдеу, косметика және фармацевтика өнеркәсібінде қолдануға жоғары мүмкіндік бар екенін дәлелдейді.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу объектісі ретінде Алматы облысында жемістердің нағыз физиологиялық піскен кезеңінде (2025 жылғы шілде–тамыз айларында) жиналған Juglans regia L. жаңғағының жасыл қабығы мен қабығы алынды. Шикізатты фотодеструкцияны және юглон мен басқа биологиялық белсенді қосылыстардың ыдырауын болдырмау мақсатында тікелей күн сәулесінен қорғай отырып, ≤ 45 °C температурада тұрақты массаға дейін кептірді. Кептірілген материал химиялық тұрақтылықты сақтау мақсатында герметикалық қара контейнерлерде ≤ 25 °C температурада және ≤ 12 % салыстырмалы ылғалдылықта сақталды.

Шикізатты дайындау екі сатылы ұнтақтауды қамтамасыз етті: алдымен Novital Magnum 4V соққылы ұнтақтағышпен 1–2,5 мм фракциясына дейін алдын ала ұнтақталды, кейін МШЛ-1П

лабораториялық шарлы ұнтақтағышпен 0,15 мм бөлшектерге дейін майдаланды. Ұнтақтың гранулометриялық құрамын стандарттау үшін олар қосымша 0,1–0,25 мм лабораториялық електерден өткізілді. Мұндай дайындық «қатты фазаның – еріткішпен» байланысатын беткі ауданын барынша арттыруға мүмкіндік беріп, экстракцияның тиімділігін айтарлықтай жоғарылатты.

Биологиялық белсенді қосылыстарды экстракциялау Сокслет әдісімен, «АСВ-6» жартылай автоматтандырылған аппаратындағы колбаны қолдану арқылы жүргізілді. Алдын ала ұнтақталған шикізаттың (2,00 ± 0,01 г) ілмектері экстракциялық гильзаға орналастырылды, ал колбаға 45 мл еріткіш (этанол немесе этилацетат) құйылды. Үрдіс 40–80 °С температурада жүргізілді: еріткішпен байланыс кезеңі – 30 минут, таза еріткішпен шаю – 60–180 минут. Экстракциядан кейін алынған экстракт салқындатылып, сүзгіден өткізілді және вакуумдық жағдайда ≤ 40 °С температурада 10 мл көлеміне дейін буланды. Алынған концентраттар юглон мен басқа фенолды қосылыстардың тұрақтылығын сақтау мақсатында қараңғы флакондарда t ≤ 8 °С температурада сақталды.

Тәжірибеде алынған экстрактардағы юглон мөлшері жоғары тиімділікпен сұйықтық хроматографиясы (ЖТШХ) әдісімен анықталды. Талдау үшін стандартталған юглон ерітінділері, С18 колонкасы және 254 нм толқын ұзындығындағы УФ-спектроскопиялық детектор ұсынылды. Сандық көрсеткіштер калибрлеу қисығына сәйкес есептелді, бұл әртүрлі шикізат фракцияларынан алынған юглон шығымының дәл мәндерін алуға мүмкіндік берді.

Нәтижелер мен талқылау. Грек жаңғағының (Juglans regia L.) жасыл қабығы мен қабығының биологиялық белсенді қосылыстар көзі ретінде потенциалын бағалау үшін олардың химиялық құрамына кешенді талдау жүргізілді. Арнайы назар нафтохинон қосылыстарына, ең алдымен юглонға (5-гидрокси-1,4-нафтохинон) назар аударылды, себебі ол биологиялық белсенді маркер ретінде қызмет етеді.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, юглон мен басқа фенолды қосылыстардың концентрациясы жаңғақтың морфологиялық бөліктеріне қарай айтарлықтай өзгереді. Жасыл қабық фенолдардың мөлшері бойынша қабыққа қарағанда әлдеқайда бай болып келсе, бұл метаболиттердің жемістің сыртқы беткі тіндерінде орналасуы және патогендерге сезімталдығына байланысты атқаратын қорғаныштық функциясымен түсіндіріледі. (1-кесте).

1 - кесте. Juglans regia L. өсімдік шикізатының химиялық сипаттамасы

Көрсеткіш	Жасыл қабық	Қабық
Ылғалдылық, %	8,5 ± 0,4	6,2 ± 0,3
Күл, %	7,1 ± 0,2	4,8 ± 0,2
Жалпы фенолды қосылыстар, мг ГҚ/г	85–95	28–35
Юглон, мг/г құрғақ зат	5,8–6,5	1,2–1,6

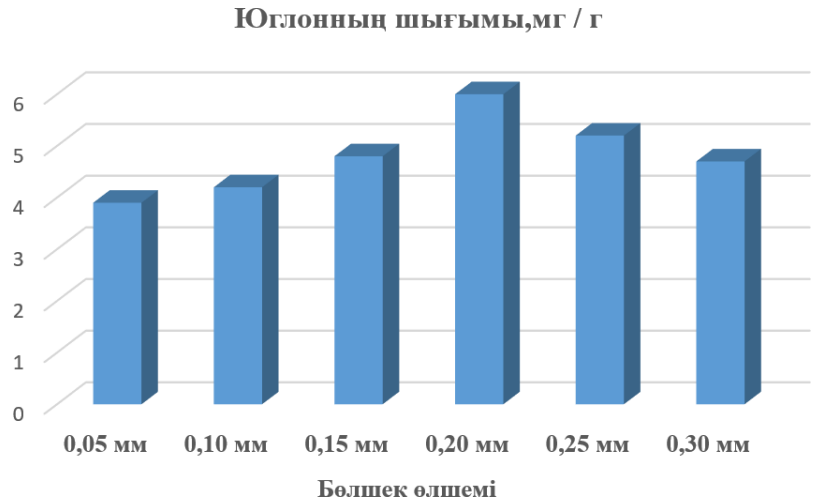
Кесте деректерінен сүйенсек, грек жаңғағының жасыл қабығында фенолды қосылыстардың (85–95 мг ГҚ/г) және юглонның (5,8–6,5 мг/г) мөлшері қабықшаға қарағанда едәуір жоғары. Бұл құбылыс аталған қосылыстардың жемістің сыртқы тіндерінде атқаратын қорғаныштық қасиетімен байланысты. Жасыл қабықтың ылғалдылығы мен күлділігі төмен деңгейде сақталады, бұл шикізатты сақтау және технологиялық өңдеу кезінде оның тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Осыған байланысты грек жаңғағының жасыл қабығы биологиялық белсенді заттарды экстракциялау және олардың антиоксиданттық әлеуетін бағалау үшін ең қолайлы шикізат ретінде пайдаланылады.

Экстракция процесінің тиімділігін қамтама-

сыз ету үшін шикізатқа алдын ала дайындық кезеңі жүргізіледі. Бұл кезеңде қабықша мен жасыл қабық жақсылап іріктеліп, қажетті өлшемге дейін ұнтақталады және оптималды ылғалдылық деңгейіне кептіріледі. Дайындалған шикізаттың біркелкілігі және құрылымдық сипаттамалары юглонның ерітіндіге максималды өтуіне ықпал етеді, яғни массалық тасымалдау мен диффузия процестерін оңтайландырады (сур.1).



1-сурет. Грек жаңғағының (Juglans regia L.) өсімдік шикізатын юглон экстракциясына дайындау: қабықша және жасыл қабық»



2-сурет. Экстракция кезінде бөлшек мөлшерінің юглон шығымына әсері

Суретте көрсетілгендей, жасыл қабық пен қабықшаны дайындау барысында бөлшектердің өлшемі, біркелкілігі және материалдың басты критерий болып табылады. Бұл дайындық юглонның кейінгі экстракциядағы максималды шығымын қамтамасыз етуге және алынған экстрактінің сапасын тұрақтандыруға негіз болады.

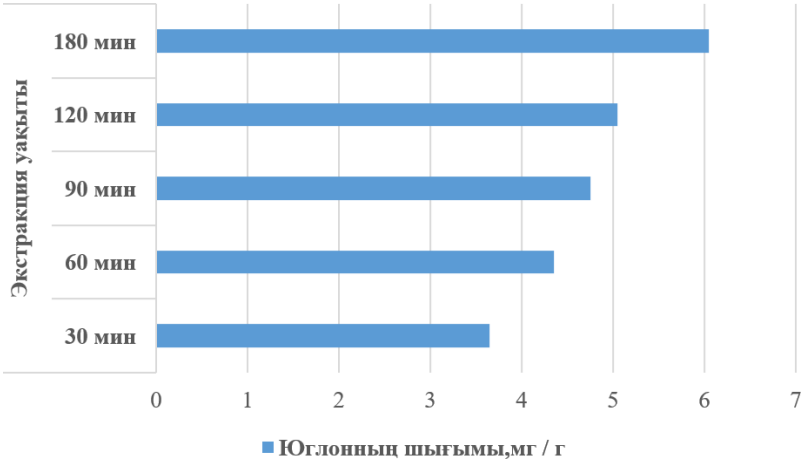
Алынған эксперименттік деректер шикізаттың гранулометриялық құрамының юглонды экстракциялау үрдісіндегі айқындаушы рөлін көрсетеді. Диаграмма деректері бойынша бөлшек өлшемінің 0,05-тен 0,20 мм-ге дейін көбеюі юглон шығымының 3,9-дан 6,0 мг/г-ге дейін артуымен қатар жүреді (сур.2).

Бөлшек өлшемінің одан әрі 0,25–0,30 мм-ге дейін көбеюі юглон шығымының 5,2–4,7 мг/г деңгейіне төмендеуіне әкеледі. Мұндай үрдіс экстрагирлеуші ортамен жанасу кезінде бетінің азаюына және биологиялық белсенді қосылыстың диффузиялық тасымалының баяулауына байланысты деп пайымдауға болады. Осылайша, шамамен 0,20 мм бөлшек өлшемі юглонды кейінгі экстракциялау үшін ең ұтымды гранулометриялық көрсеткіш ретінде қарастырылуы мүмкін.

Тәжірибелік нәтижелерді талдау экстракция температурасының жоғарылауы юглон шығымының біртіндеп артуымен сипатталатынын көрсетті. Атап айтқанда, 40 °C температурада юглонның шығымы 3,65 мг/г болса, 60–80 °C аралығында бұл көрсеткіш 4,85–5,05 мг/г деңгейіне дейін көбейді (2-кесте).

2 - кесте. Экстракция үрдісінің температуралық аспектілері

Экстракция температурасы, °C	Юглон шығымы, мг/г
40	3,65
60	4,85
70	4,95
80	5,05



1 - сурет. Экстракция уақыты және экстракттағы юглонның жинақталу динамикасы

Температураның жоғарылауына байланысты юглон шығымының артуы масса алмасу үрдістерінің қарқынданумен, қосылыстың еріткіште жақсырақ еруімен және өсімдік матрицасынан диффузия жылдамдығының жоғарылауымен түсіндіріледі. Сонымен қатар, зерттелген температуралық аралықта юглонның термиялық ыдырау белгілері байқалмады, бұл экстракцияның берілген шарттарында қосылыстың жеткілікті термотұрақтылығын көрсетеді.

Юглонның экстрактта жинақталу динамикасы экстракция уақытының ұлғаюына қарай оның концентрациясының тұрақты түрде артуымен сипатталады. Экстракцияның алғашқы 30–90 минуты аралығында юглонның қарқынды бөлініуі байқалып, шығым мөлшері 3,65-тен 4,75 мг/г-ге дейін артты (сур.3).

Экстракция ұзақтығы 120 және 180 минутқа дейін ұзартылған кезде юглонның шығымы сәйкесінше 5,05 және 6,05 мг/г мәндеріне дейін жетті. Зерттелген уақыт аралығында айқын өсінің байқалмауы юглонды бөліп алу про-

цесінің негізінен диффузиялық механизммен шектелетінін көрсетеді. Яғни, экстракция уақыты ұлғайған сайын, юглон өсімдік шикізатынан ерітіндіге біртіндеп және толық өткен кезде, бұл алынған экстракттің концентрациясының тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Алынған экстракттің қасиеттерін бағалау үшін оның негізгі физико-химиялық көрсеткіштері қарастырылды. Юглонның молекулалық құрылымы мен физико-химиялық сипаттамалары экстракция үрдісінің тиімділігін түсінуге мүмкіндік береді, сонымен қатар алынған өнімнің тұрақтылығы мен келесі қолданылуына баға береді (3-кесте).

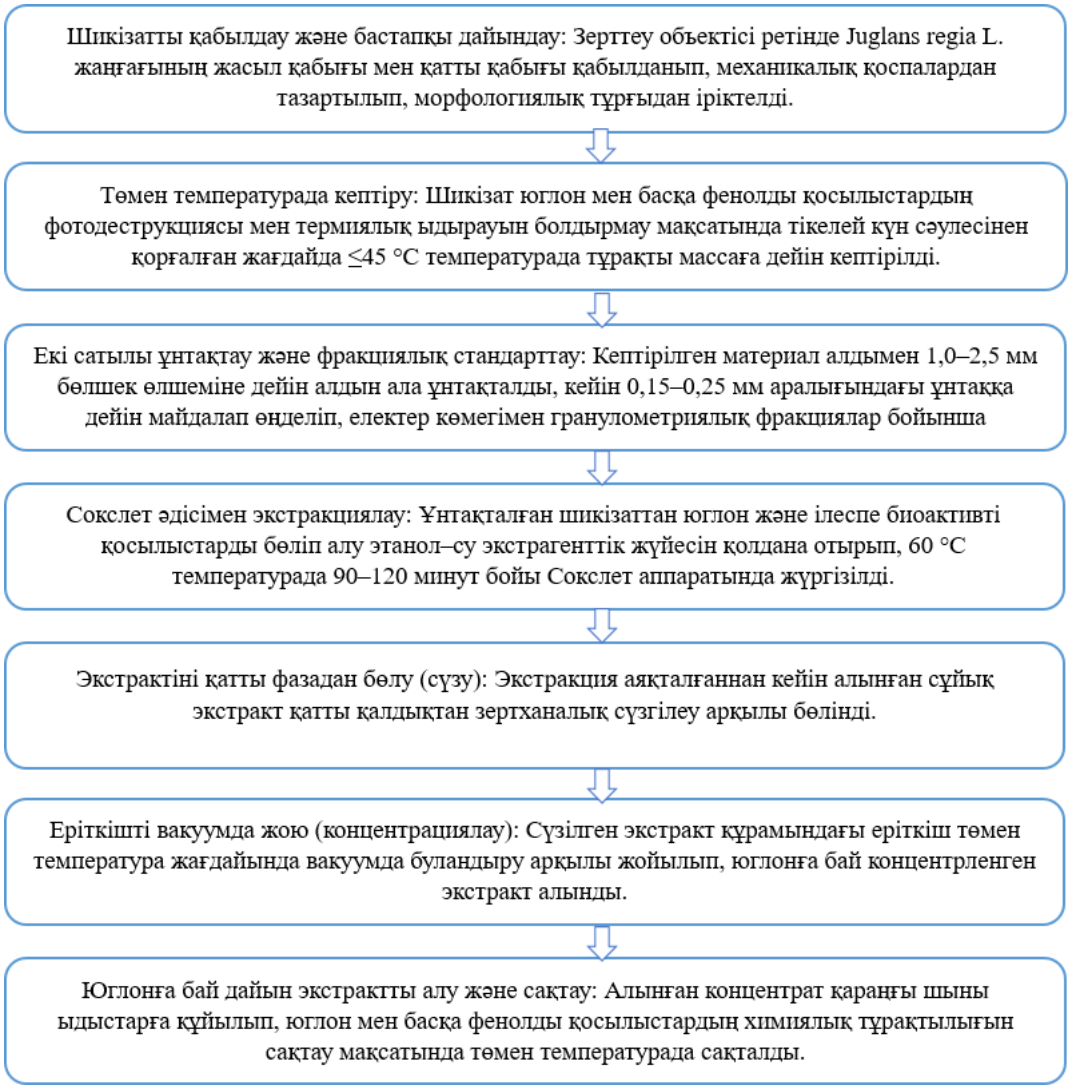
1 - кесте. Юглон экстрактісінің физика-химиялық қасиеттерінің көрсеткіші

Қасиеті	**Мәні**
Молекулалық массасы	174,15 г/моль
Балқу температурасы	161–163 °C
Суда ерігіштігі	Нашар ериді
Органикалық еріткіштерде ерігіштігі	Жақсы ериді (диоксан, ацетон, хлороформ, бензол, сірке қышқылы)
pKa	6,96
Түсі	Сары-қызғылт кристалды ұнтақ
Ыдырау температурасы	385 °C

Юглонның молекулалық құрылымы, ерігіштік қасиеттері және температураға төзімділігі оның экстракция тиімділігін, сондай-ақ концентрацияны бақылау мен сақтау шарттарын анықтауға мүмкіндік береді. Мысалы, оның суда нашар еруі мен органикалық еріткіштерде жақсы еруі этанол немесе этилацетат сияқты полярлық қасиеті орташа еріткіштердің қолданылуын айқындайды. Сонымен қатар, жоғары ыдырау температурасы (385 °C) юглонның термотұрақытлығын көрсетеді, бұл вакуумдық буландыру немесе төмен температуралы сақтау кезінде биоактивтіліктің сақталуын қамтамасыз етеді.

Юглонды Juglans regia L. қабығынан алу процесі оның молекулалық қасиеттеріне және биобелсенділігін сақтауға бағытталған операциялық блоктар арқылы ұйымдастырылған. Шикізатты дайындау, кептіру және ұнтақтау кезеңдері экстракция тиімділігін қамтамасыз етеді, ал соңғы концентрациялау мен сақтау процестері алынған қосылыстардың химиялық тұрақтылығын сақтап тұруға мүмкіндік береді (сур.4).

Суретте көрсетілген технологиялық схема юглонды экстракциялау үрдісінің әрбір кезеңін нақты көрсетеді. Шикізатты қабылдау және бастапқы дайындау: механикалық қосылыстарды жойып, морфологиялық сұрыптауды қамтамасыз етеді. Кептіру кезеңі: фотодеструкция мен термиялық ыдырауды болдырмай, биологиялық белсенділікті сақтайды. Ұнтақтау және фракциялық стандарттау: экстракция тиімділігін арттырады, ал Сокслет әдісімен экстракциялау: юглон мен басқа фенолды қосылыстарды бөліп алудың жоғары нәтижесін береді. Сүзу және вакуумдық концентрация: алынған экстракттан еріткішті тиімді түрде бөліп, концентраттың сапасын қамтамасыз етеді. Соңғы кезеңде: дайын концентрат қара ыдыстарда төмен температурада сақталып, химиялық тұрақтылық пен биоактивтілікті сақтауға мүмкіндік береді. Бұл сызба юглонның молекулалық қасиеттерін ескере отырып, зертханалық жағдайда және өндірістік масштабта қолдануға ғылыми тұрғыдан негізделген.



1 - сурет. Юглон экстракциясын алу технологиясы

Қорытынды. Жүргізілген зерттеулер нәтижелері бойынша юглонды экстракциялау үрдісінің кешенді сипаттамасын беріп, оның ғылыми негізін нақтылады. Талдау көрсеткендей, морфологиялық бөліктер мен олардың физика-химиялық қасиеттері, гранулометриялық құрылымы және ылғалдылық экстракция тиімділігін анықтайтын негізгі көрсеткіштер болып табылады. Ұнтақтау мен фракциялық стандарттау арқылы қатты фазаның беткі ауданы артып, масса тасымалдау мен диффузия үрдістері жетілдіріледі, бұл юглон мен басқа фенолды қосылыстардың ерітіндіге максималды өтуіне мүмкіндік береді. Экстракция температурасы мен ұзақтығының таңдалуы қосылыстардың шығымын арттырады, ал Сокслет әдісі биобелсенді компоненттердің толық бөлінуін қамтамасыз етеді.

Сүзу және вакуумдық концентрация кезеңдері алынған экстрактың химиялық тұрақтылығын сақтап, юглонның термотөзімділігін қамтамасыз етеді. Нәтижесінде алынған өнім құрғақ, юглонның жоғары концентрациялы экстракты мол көзі болып шықты, құрамындағы фенолды қосылыстар мен биологиялық белсенді компоненттердің антиоксиданттық қасиеті толық сақталған. Бұл экстракт фармацевтикалық, косметикалық және функционалды тағамдық және қайта өңдеу өндірістерінде қолдануға дайын, әрі ғылыми тұрғыдан негізделген, өндірістік қолдануға жарамды компонент болып табылады. Жүргізілген жұмыс экстракция үрдісінің әрбір кезеңінің рөлін, олардың өзара байланысын және

алынған өнім сапасына әсерін терең түсінуге мүмкіндік берді, сондай-ақ технологиялық үрдісті жетілдіруге және болашақта өндірістік ауқымда шығаруға толық негізін қалады.

Қаржыландыру. Жұмыс Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігі, AP26197887 ”Тамақ өнеркәсібінде қолдану үшін юглонды өсімдік көздерінен экстракциялау технологиясын әзірлеу” ҒЗЖ қаржыландыратын жоба шеңберінде орындалды.

Авторлар «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Астана, Қазақстан) қызметкерлеріне тәжірибелік зерттеулерді жүргізуге және алынған нәтижелерді талқылауға көрсеткен жәрдемі үшін шын жүректен алғыс білдіреді.

Әдебиеттер

1. Li C. et al. A novel method to extract juglone from Juglans mandshurica waste branches using a water-in-oil microemulsion //Waste and Biomass Valorization. -2022.-Vol.13(3). - P.1547-1563. DOI 10.1007/s12649-021-01611-x.

2. Ramezani N. et al. Juglone extraction from walnut (Juglans regia L.) green husk by supercritical CO2: Process optimization using Taguchi method //Journal of Environmental Chemical Engineering. - 2020.- Vol.8(3). - P.103776. DOI10.1016/j.jece.2020.103776.

3. Jahanban-Esfahlan A. et al. A comparative review on the extraction, antioxidant content and antioxidant potential of different parts of walnut (Juglans regia L.) fruit and tree //Molecules. – 2019. -Vol.24(11). - P.2133. DOI 10.3390/molecules24112133.

4. Luksiene J. Et al. Examining the Role of Extraction Techniques and Regional Variability in the Antioxidant and Phytochemical Composition of Juglans regia L. Septa //Plants. -2025.- Vol.14(16)-P.2524. DOI 10.3390/plants14162524.

5. Fernández-Agulló A. et al. Optimization of the extraction of bioactive compounds from walnut (Juglans major 209 x Juglans regia) leaves: Antioxidant capacity and phenolic profile //Antioxidants. -2019. - Vol.9(1). – P.18. DOI 10.3390/antiox9010018.

6. Pop A. et al. Enhanced recovery of phenolic and tocopherolic compounds from walnut (Juglans regia L.) male flowers based on process optimization of ultrasonic assisted-extraction: Phytochemical profile and biological activities //Antioxidants. -2021.- Vol.10(4). - P.607. DOI 10.3390/antiox10040607.

7. Seabra I. J. et al. Two-step high pressure solvent extraction of walnut (Juglans regia L.) husks: scCO2+ CO2/ethanol/H2O //Journal of CO2 Utilization. - 2019.- Vol.34.- P.375-385. DOI 10.1016/j.jcou.2019.07.028.

8. Rajković K. M. et al. Optimization of extraction yield and chemical characterization of optimal extract from Juglans nigra L. leaves //Chemical Engineering Research and Design. -2020.- Vol.157.- P.25-33. DOI 10.1016/j.cherd.2020.03.002.

9. Zhang Y. G. et al. Comparison of phenolic compounds extracted from Diaphragma juglandis fructus, walnut pellicle, and flowers of Juglans regia using methanol, ultrasonic wave, and enzyme assisted-extraction //Food chemistry. - 2020.- Vol.321. – P.126672. DOI 10.1016/j.foodchem.2020.126672.

10. Rusu M. E. et al. Process optimization for improved phenolic compounds recovery from walnut (Juglans regia L.) septum: Phytochemical profile and biological activities //Molecules. -2018. –Vol.23(11): 2814. DOI 10.3390/molecules23112814.

11. Cordova I. W. et al. Extraction of phenolic compounds from Juglans regia L. leaves using aqueous solutions of eutectic solvents //Separation and Purification Technology. -2025.- Vol.354(7): 129214. DOI 10.1016/j.seppur.2024.129214.

12. Paşayeva L. Et al. Optimizing health benefits of walnut (Juglans regia L.) agricultural by-products: impact of maceration and Soxhlet extraction methods on phytochemical composition, enzyme Inhibition, antioxidant, antimicrobial, and cytotoxic activities //Food Bioscience. -2025. Vol.64:105923. DOI 10.1016/j.fbio.2025.105923.

13. Bazarniva J. et al. Extraction of polyphenolic compounds from the Juglans regia L. pellicles of using ultrasound //The chemistry of plant materials-2023. -№.1.- P.273-278. DOI 10.4258/jcprm.2023011970.

Авторлар туралы мәлімет

Султанова М.Ж. - докторант, Алматы технологиялық университеті АҚ, Алматы, Қазақстан, e-mail: sultanova.2012@mail.ru;

Сагындыков У.З. - биология ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Л. Н. Гумилев атындағы Е-уразия ұлттық университеті, Астана, Қазахстан, e-mail: outemourate@list.ru;

Сәдуақас А.С. - ғылыми қызметкер, «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ҒЗИ» ЖШС, Астана, Қазақстан, e-mail: aykon96@mail.ru;

Якияева М.А. - PhD, қауымдастырылған профессор, Алматы технологиялық университеті АҚ, Алматы, Қазақстан, e-mail: yamadina88@mail.ru;

Камали А.С. - кіші ғылыми қызметкер, «Қазақ қайта өңдеу және тағам өнеркәсіптері ҒЗИ» ЖШС, Астана, Қазақстан, e-mail: akerke.kamali@bk.ru;

Акжанов Н. - докторант, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазахстан, e-mail: nurtore0308@gmail.com.

Information about the authors

Sultanova M.Zh. - Doctoral student, Almaty Technological University JSC, Almaty, Kazakhstan, e-mail: sultanova.2012@mail.ru;

Sagyndykov U.Z. - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: outemourate@list.ru;

Saduakas A.S. - Researcher, Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: aykon96@mail.ru;

Yakiyaeva M.A.- Ph.D., Associate Professor, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: yamadina88@mail.ru;

Kamali A.S. - Junior Researcher, Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: akerke.kamali@bk.ru;

Akzhanov N.- Doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: nurtore0308@gmail.com.

МРНТИ 65.35.03 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1414**

ҰННАН ЖАСАЛҒАН КОНДИТЕРЛІК ӨНІМДЕРГЕ ҚОЛДАНАТЫН ЖИДЕК ДАҚЫЛДАРЫНАН АЛЫНҒАН ҰНТАҚТАРДЫҢ ФИЗИКА ХИМИЯЛЫҚ ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

А.М. Омаралиева, Ж.Т. Ботбаева✉, А.Ж. Хастаева, А.А. Бектурганова, М.Т. Агедилова, А.М. Рахимжанова, А.К. Аубакирова

Қ. Құлажанов атындағы Казақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан

✉ *Корреспондент-автор: zhanar.b.t88@gmail.com*

Мақалада конвективті кептіру әдісімен алыуған жидек дақылдарының (таңқурай мен қарақат жидектерінен) жасалған құрғақ ұнтақтардың физика хиимялық антиоксиданттық аминқышқылдық және микроқұрылымдық сипаттамаларын кешенді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жұмыстың мақсаты ұннан жасалатын кондитерлік өнімдер технологиясында қолдану бағыттарын негіздеу үшін олардың тағамдық, биологиялық және технологиялық құндылығын бағалау.

Зерттеу нәтижелері бойынша таңқурай ұнтағының ақуыз мөлшері (7,21 ±0,09%) болса, ал майдың (3,26±0,04%) жоғары мөлшерімен сипатталды, сонымен қатар қарақат ұнтағында көмірсулардың жоғары (60,55 ±0,78%) болатындай мөлшері анықталды. Майда еритін және суда еритін антиоксиданттардың жиынтық мөлшері ең жоғарғы деңгейде қарақат ұнтағында байқалды (0,42±0,003 және 2,10±0,047мг/г) бұл оның жоғарғы биологиялық белсенділігін байқатты.

Өнімдердің аминқышқылдық құрамын талдау зерттелген ұнтақтардың құрамында алмастырылмайтын және алмастырылатын аминқышқылдарының бар екенін, олардың ішінде лизин, лейцин, валин және аланиннің басым екенін көрсетті, бұл олардың өсімдік текті ақуыздардың көзі ретінде бағалауға мүмкіндік береді. Микроқұрылымдық зерттеулер таңқурай ұнтағының жоғары дисперстілігімен және кеуектілігімен сипатталатынын, соның нәтижесінде оның дымқылдануы артып, қамырда біркелкі таралатыны анықталды. Ал, қарақат ұнтағы тығызырақ агрегатталған құрылымымен және кеуектілігімен (20-30%) ерекшеленеді.

Алынған нәтижелер жидек дақылдарынан алынған ұнтақтарды ұннан жасалатын кондитерлік өнімдерді байытуға, оларыдың тағамдық және құрылымдық сипаттамаларымен жақсартуға, сондайақ өнімнің органолептикалық және құрылымдық сипаттамаларын жақсартуға арналған функционалдық ингредиенттер ретінде пайдаланудың болашақтағы алдыңғы қатарлы әдіс екендігін дәлелдейді.

Түйін сөздер: таңқурай, қарақат, құрғақ ұнтақ, конвективтің кептіруі, физика-химиялық қасиеттер, антиоксиданттық қасиеттер, құрғақ ұнтақтардың микроқұрылымы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ ИЗ ЯГОДНЫХ КУЛЬТУР ДЛЯ МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ

А.М. Омаралиева, Ж.Т. Ботбаева✉, А.Ж. Хастаева, А.А. Бектурганова, М.Т. Агедилова, А.М. Рахимжанова, А.К. Аубакирова

Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: zhanar.b.t88@gmail.com

В статье представлены результаты комплексного исследования физико-химических антиоксидантных аминокислотных и микроструктурных характеристик сухих порошков ягодных культур (малины и смородины), полученных методом конвективной сушки. Целью работы была оценка их

пищевой, биологической и технологической ценности для обоснования их применения в технологии производства мучных кондитерских изделий.

По результатам исследования, малиновый порошок характеризовался высоким содержанием белка (7,21 ±0,09%) и жира (3,26 ±0,04%), а порошок черной смородины — высоким содержанием углеводов (60,55 ±0,78%). Общее содержание жирорастворимых и водорастворимых антиоксидантов было самым высоким в порошке черной смородины (0,42 ±0,003 и 2,10 ±0,047 мг/г соответственно), что указывает на его высокую биологическую активность.

Анализ аминокислотного состава продуктов показал, что исследованные порошки содержат незаменимые и заменяемые аминокислоты, среди которых преобладают лизин, лейцин, валин и аланин, что позволяет оценивать их как источник растительных белков. Микроструктурные исследования показали, что малиновый порошок характеризуется высокой дисперсией и пористостью, в результате чего повышается его смачиваемость и равномерное распределение в тесте. Порошок черной смородины, напротив, отличается более плотной агрегированной структурой и пористостью (20-30%).

Полученные результаты доказывают, что использование порошков из ягодных культур в качестве функциональных ингредиентов для обогащения мучных кондитерских изделий, улучшения их питательных и структурных характеристик, а также улучшения органолептических и структурных свойств продукта является перспективным методом в будущем.

Ключевые слова: малина, смородина, сухой порошок, конвективная сушка, физико-химические свойства, антиоксидантные свойства, микроструктура сухих порошков.

STUDY OF THE PHYSICOCHEMICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF BERRY POWDERS FOR FLOUR CONFECTIONERY PRODUCTS

A.M. Omaraliyeva, Zh.T. Botbayeva✉, A.Zh. Khastayeva, A.A. Bekturganova, M.T. Agedilova, A.M. Rakhimzhanova, A.K. Aubakirova

K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhanar.b.t88@gmail.com

This article presents the results of a comprehensive study of the physicochemical antioxidant, amino acid, and microstructural characteristics of dry berry powders (raspberries and currants) obtained by convective drying. The aim of the study was to evaluate their nutritional, biological, and technological value to justify their use in flour confectionery production.

According to the study, raspberry powder was characterized by a high protein content (7.21 ±0.09%) and fat (3.26 ±0.04%), while blackcurrant powder was high in carbohydrates (60.55 ±0.78%). The total content of fat-soluble and water-soluble antioxidants was highest in blackcurrant powder (0.42 ±0.003 and 2.10 ±0.047 mg/g, respectively), indicating its high biological activity. An analysis of the amino acid composition of the products revealed that the powders contained essential and nonessential amino acids, predominantly lysine, leucine, valine, and alanine, allowing them to be evaluated as a source of plant proteins. Microstructural studies revealed that raspberry powder is characterized by high dispersion and porosity, resulting in increased wettability and uniform distribution in dough. Blackcurrant powder, in contrast, has a denser aggregated structure and porosity (20-30%).

These results demonstrate that the use of berry powders as functional ingredients for enriching flour confectionery products, improving their nutritional and structural properties, and enhancing the organoleptic and structural properties of the product is a promising approach for the future.

Keywords: raspberry, currant, dry powder, convective drying, physicochemical properties, antioxidant properties, microstructure of dry powders.

Кіріспе. Ұннан жасалатын кондитерлік өнімдер (печенье пряниктер және тағы басқа) қолжетімділігі, ұзақ сақталу мерзімі және тұрақты сұранысқа ие күнделікті тұтынатын, ең кең таралған өнімдердің қатарына жатады. Сонымен қатар, дәстүрлі рецептуралар оңай сіңетін көмірсулардың жоғары мөлшерімен және тағамдық талшықтардың, витаминдердің және биологиялық белсенді заттардың салыстырмалы түрде төмен үлесімен сипатталады, бұл олардың тағамдық және биологиялық құндылығын арттыруға бағытталған жіне тәсілдерді әзірлеу қажеттілігін туындатады [1,2].

Соңғы жылдары, әлемдік тағамдық технологиялар практикасында жеміс-жидек ұнтақтарын сондай-ақ, оларды өңдеуі кезінде алынатын жанама өнімдерді функционалдық ингредиенттер ретінде пайдалану бағыты белсенді дамып келеді. Әдебиеттерге шолу сипатындағы зерттеулер мұндай қоспалардың тағамдық талшықтардың, полифенолдардың органикалық қышқылдардың және дайын өнімдердің антиоксиданттық белсенділігі мен нутриенттік тығыздығын арттыруға қабілетті табиғи пигменттердің құнды көзі болып табылатынын көрсетеді.

Шетелдік зерттеулерде антоциондар мен басқа да фенолдық қосылыстардың жоғарғы мөлшерімен ерекшеленетін жидек дақылдарын пайдалануға ерекше көңіл бөлінуде. Қарақат жидегінің антиоксиданттары жоғары биологиялық белесенділігімен ерекшеленетін алдыңғы қатарлы сапалы көздерінің бірі ретінде қарастырылады [2,6,8]. Эксперименттік жұмыстар қарақат ұнтақтары мен сығымдалған қалдықтарын печенье және басқа да ұннан жасалатын өнімдер технологиясында қолданудың тиімділігін растайды, бұл дайын өнімдердің антиоксиданттық әлеуетінің артуымен және функционалдық қасиеттерінің жақсаруымен қатар жүреді [3].

Ұқсас үрдістер зерттеу барысында, таңқурай ұнтақтарын қолдану кезінде де анықталды. Таңқурай ұнтағын енгізу өнімдердегі фенолдық қосылыстардың мөлшерін және антиоксиданттық белсенділікті арттыруға, сондай-ақ дәм иіс профилінің айқын қалыптасуына әсер ететіні көрсетілген, алайда бұл дайын өнімнің сынғыштығы мен құрылымдық механикалық сипаттамаларын кешенді бағалай қажеттілігін көрсетеді [4]. Осыған байланысты шетелдік авторлар байытылған өнімдердің химиялық құрамымен қатар құрылымдық-механикалық сипаттамаларын кешенді бағалау қажеттігін атап көрсетеді [5].

Жидек ұнтақтарының сапасы мен функционалдық қасиеттерін айқындайтын маңызды факторларының бірі - оларды бөліп алу әдісі. Зерттеулер өнімдерді кептіру параметрлерінің полифенолдарының С дәруменінің, антициандары мен каротиноидтарының сақталуына, сондай ақ бөлшектерінің морфологиясы мен материалдың кеуектілігінің қалыптасуына елеулі әсер ететінін көрсетеді [6-8]. Дұрыс таңдалмаған режимдерде жүргізілген конвективті кептіру термолабильді қосылыстардың ішінара деградациясына және ұнтақтардың құрылымдық сипаттамаларының нашарлауына әкелуі мүмкін екені анықталған [9].

Сонымен қатар пісіру процесі кезінде термиялық өңдеу биологиялық белсенді заттардың қосымша азаюына себеп болуы мүмкін. Жидек сығындыларымен байытылған ұннан жасалатын өнімдердегі полифенолдардың тұрақтылығын зерттеу олардың сақталу дәрежесі пісірудің температуралық уақыттық параметрлеріне және қамыр жүйесінің құрамына тәуелді екендігі анықталды [10]. Осыған орай ұнтақтардың микроқұрылымы, олардың химиялық құрамы және дайын өнім құрамындағы биоактивті компоненттердің тұрақтылығы арасындағы өзара байланысты зерттеу ерекше мағызға ие.

Шетелдік жарияланымдардың едәуір санына қарамастан, зерттеулердің басым бөлігі шикізаттың жекелеген түрлеріне немесе көрсеткіштердің жеке топтарына бағытталған, ал жидек ұнтақтарының физика-химиялық қасиеттерін, антиоксиданттық белсенділігін, аминқышқылдық құрамын және морфометриялық сипаттамаларын біріктере отырып жүргізілген кешенді жұмыстары әлі де шектеулі болып отыр, әсіресе отындық шикізатты пайдалану жағдайында [11,12].

Қазақстан жағдайында жергілікті жидек дақылдарын пайдалану және оларды терең өң-

деу технологияларын әзірлеу арқылы функционалдық ингредиенттер алу өзекті мәнге ие болуда, бұл жаппай тұтынылатын тағам өнімдерінің ассортиментін кеңейтуге және олардың тағамдық құндылығын арттыруға ықпал етеді.

Осыған байланысты аталған зерттеудің мақсаты конвективті кептіру әдісімен алынған жидек дақылдарынан (таңқурай мен қарақаттан) жасалған ұнтақтардың физика- химиялық көрсеткіштерін, антиоксиданттық белсенділігін, аминқышқылдық құрамын және микроқұрылымдық сипаттамаларын кешенді түрде бағалау арқылы оларды ұннан жасалатын кондитерлік өнімдер технологиясында пайдалану бағыттарын негіздеу болып табылады.

Материалдар мен тәсілдер. Зерттеу нысандары ретінде 2024 және 2025 жылдардағы өнімнен алынған жидек дақылдары (таңқурай мен қарақат) пайдаланылады. Аталған дақылдардан әртүрлі температуралық режимде, қабат қалыңдағанда және үрдіс қиындағанда конвективті кептіру әдісі арқылы құрғақ ұнтақтар алынды.

Жидек дақылдарынан алынған ұнтақтардың физика-химиялық қасиеттерін зерттеу стандартты жағдайларда жүргізілді: температура - 21 ^{0}С, ауаның салыстырмалы ылғалдылығы - 64%. Көрсеткіштерді анықтау қолданыстағы нормативтік құжаттарға сәйкес жүзеге асырылды. Ақуыздың массалық үлесі Кьелдаль әдісімен, майдың массалық үлесі Сокслет әдісімен, көмірсулардың массалық үлесі МЕМСТ 54037-2010 стандартына сәйкес перманганатометриялық әдіспен анықталды.

Антиоксиданттардың мөлшерін анықтау ГОСТ Р54037-2010 талаптарына сәйкес Цвет Яуза-01-АА аспабында амперметриялық әдіспен жүргізілді. Барлық өлшеулерде стандарт ретінде кварцетин қолданылды.

Құрғақ ұнтақтардың микроқұрылымдарын талдауы 5-10х үлкейту кезінде оптикалық микроскопия әдісімен жүргізілді. Суреттерді өңдеу үшін бағдарламалық қамтамасыз етуі пайдаланып, бөлшектердің орташа өлшемі, диаметрлер бойынша таралу диапазоны, дөңгелектік коэффициенті және ұнтақтардың салыстырмалы кеуектілігі анықталды.

Микроскопиялық суреттерді алу үшін әрбір ұнтақтардың аз мөлшері шыны негізге біркелкі таралады. Суреттер 5х объективін қолдана отырып, қараңғы өріс режимінде түсірілді. Фокус тереңдігін арттыру мақсатында брекетинг әдісі қолданылды, яғни үлгінің бір аймағында әртүрлі фокуста бірнеше сурет түсіріліп, кейін олар Helicon Focus бағдарламасында біртұтас бейнеге біріктірілді.

Барлық эксперименттік зерттеулер кемінде үш қайталымда жасалады. Алынған деректер Microsoft Exel пакеті мен Statistica 10.0 бағдарламасын пайдалана отырып вариациялық статистика әдістерімен өңделді.Нәтижелер орташа мәндер және олардың стандарттық ауырқулары (M±SD) түрінде ұсынылды. Орташа мәндер арасындағы айырмашылықтардың статистикалық сенімділігі $p<0.05$ мәнділік деңгейінде Стьюдент критерийі арқылы бағаланады.

Нәтижелер мен талқылау. Жидек дақылдарынан алынған ұнтақтардың физика-химиялық қасиеттерін зерттеу олардың тағамдық және биологиялық құндылығын бағалау, сондай-ақ тағам өнеркәсібінде практикалық қолдану бағыттарын анықтау үшін маңызды болып табылады. Талдау барысында кейбір критерийлер негізінде ақуыздың, майлардың және көмірсулародың массалық үлесі алынды, себебі дәл осы компоненттер өнімнің тағамдық құндылығы мен функционалдық қасиеттерін айқындайды. Көрсеткіштерді салыстырмалы түрде зерттеу дақылдар арасындағы айырмашылықтарды анықтауға, олардыңартықшылықтары мен кемшіліктерін белгілеуге, сондай –ақ оларды байытқыш немесе функционалддық қоспалыр ретінде пайдалануға болады.

1-кестеден жидек дақылдарынан алынған ұнтақтардың физика-химиялық қасиеттерінің зерттеу нәтижелерін көруге болады.

1-кестеден жидек ұнтақтарының физика-химиялық көрсеткіштерінің құрамдары бойынша бір-бірінен ерекшеленетіндігі байқалды. Ақуыздың массалық үлесі таңқурай ұнтағында (7,21±0,09%) қарақат ұнтағына (6,16±0,05%) қарағанда жоғарырақ, бұл бірінші үлгінің ақуыздық құндылығы жоғары екендігі дәлелденді.

1-кесте. Жидек дақылдарынан алынған ұнтақтардың физика-химиялық көрсеткіштері (M±SD, n=3)

Берілген көрсеткіштер	Қарақат жидегінің ұнтағы	Таңқурай жидегінің ұнтағы
Ақуыздың анықталған массалық үлес,%	6,16±0,05	7,21±0,09
Майдың массалық үлесі,%	0,95±0,01	3,26±0,04
Көмірсулардың массалық үлесі, %	60,55±0,53	41,16±0,53

Майдың массалық үлесі де таңқурай жидегінің ұнтағында едәуір жоғарылап, 3,26±0,04% құраса, қарақат жидегінің ұнтағынада бұл көрсеткіш не бәрі 0,95±0,01% - ды құрады. Сонымен таңқурай жидегінің ұнтеғы ақуыздық және май мөдшерінің жоғарылығымен ерекшеленсе, қарақат жидегінде көмірсул көрсеткіші жоғары болды.

Алынған деректер әрбір зерттелінген ұнтақ түрінің өзіндік тағамдық құндылығының жоғары екендігін дәлелдеді, сонымен қатар олар тағам өнеркәсібінің әртүрлі бағыттарында мақсатты түрде пайдалануға мүмкіндік береді.

Құрғақ ұнтақтардағы майда еритін және суда еритін антиоксиданттардың жиынтық мөлшерін амперметриялық әдістер арқылы анықтауға болады. Құрғақ жидек ұнтақтардағы майда еритін және суда еритін антиоксиданттардың жиынтық мөлшері амперметриялық әдіс арқылы анықталды. Мұндай әдістер берілген потенциал кезінде жұмысшы электродта фенолдық табиғатты қосылыстардың тотығуы нәтижесінде пайда болатын электр тоғын тіркеуге негізделген және жоғары сезімталдығы мен селективтігімен ерекшеленеді [13]. Талдау нәтижелері 2-кестеде көрсетілген.

2-кесте. Жидек дақылдарынан алынған құрғақ ұнтақтардағы антиоксиданттардың жиынтық мөлшері (құрғақ затқа мг/г) (M±SD, n=3)

Зерттелетен нысанның атауы	Майда еритін антиоксиданттар көрсеткіштері, мг/г	Судла еритін антиоксиланттардың көрсеткіштері, мг/г
Таңқурай жидегінің ұнтағы	0,18±0,001	0,73±0,0044
Қарақат жидегінің ұнтағы	0,42±0,003	2,10±0,047

Деректерді талдау (2 - кестеде келтірілген) антиоксиданттардың ең жоғары мөлшері қарақат ұнтағында шоғырланғанын көрсетті: майда еритін антиоксиданттардың көрсеткіштері: 0,42±0,003 мг/г, суда еритін антиоксиданттардың көрсеткіштері 2,10 ±0,047 мг/г.

Қарақат ұнтағындағы суда еритін антиаосиданттардың мөлшері (2,10±0,047 мг/г) таңқурай ұнтағымен салыстырғанда (0,73±0,004 мг/г) статистикалық көрсеткіштер алынған нәтижелердің жоғары екендігін көрсетті ($p<0,05$).

Қарақаттағы антиоксиданттардың жоғары концентрациясы оның құрамындағы С витамині, катехиндер мен флаваноидтарға байланысты, бұл қосылыстар кептіру процесңнен кейін де биологиялық белсенділігін сақтайды. Токоферолдар мен каротиноидтарды қамтитын майда еритін антиоксиданттық қосылыстар өнімнің функционалдық құндылығын арттырып қана қоймай, тотығу үрдістеріне де төзімділігін күшейтеді.

Осылайша қарақат ұнтақтарын кондитерлік өнімдердің рецептураларында пайдалануға арналған биологиялық белсенді қосылыстардың алдыңғы қатарлы көзі ретінде қарастыруға болады. Құрғақ жидек ұнтақтарын печенье мен пря-

ник құрамына енгізу дайын өнімдердің тағамдық құндылығын арттырып қана қоймай, айқын түс беруге және органикалық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді.

Жалпы алғанда, қарақат пен таңқурай ұнтақтары биологиялық құндылықты арттырып қана қоймай, ұннан жасалған кондитерлік өнімдердің сапасын жақсартуға қабілетті функционалдық ингредиенттер ретінде жоғары әлеуетке ие.

Аминқышқылдық құрам ақуыздың биологиялық құндылығын және оның адамдардың тамақтануында функционалдық рөлін айқындайтын маңызды көрсеткіш болып табылады. Аминқышқылдық профильді талдау алмастырылмайтын және алмастырылатын аминқышқылдардың сандық және сапалық айырмашылықтарын анықтауға мүмкіндік береді, бұл композиттік қоспалар мен функционалдық тағам өнімдерін әзірлеу барысында ерекше маңызға ие [14]. Ақуыз құрамы шикізаттың түрі мен сортына, сондай ақ жеке аминқышлылдардың сақталуына әсер етуі мүмкін технологиялық факторларға (кептіру, ұнтақтау) тәуекелді екенін ескерту қажет [15,16].

Жидек дақылдарынан алынған ұнтақтардың аминқышқылдық құрамын зерттеу нәтижелері кестеде келтірілген.

3-кесте. Ұнтақ үлгілерінің аминқышқылдық құрамын салыстырмалы талдау көрсеткіштері % (M±SD, n=3)

№	Аминқышқылдар	Таңқурай жидегі	Қарақат жидегі
1	Аргинин	0,451±0,180	0,382±0,153
2	Лизин	0,341±0,116	0,310±0,106
3	Тирозин	0,239±0,072	0,199±0,060
4	Фенилаланин	0,359±0,108	0,366±0,110
5	Гистидин	0,050±0,025	0,045±0,022
6	Лейцин+изолейцин	0,442±0,115	0,398±0,103
7	Метионин	0,064±0,022	0,103±0,035
8	Валин	0,423±0,169	0,287±0,115
9	Пролин	0,396±0,103	0,398±0,103
10	Тренонин	0,442±0,177	0,366±-0,146
11	Серин	0,479±0,124	0,310±0,081
12	Аланин	0,571±0,148	0,326±0,085
13	Глицин	0,368±0,125	0,294±0,100

3 кестеде келтірілген деректердің талдау нәтижелерінің негізінде таңқурай және қарақат жидектерінің ұнтақтарында алмастырылатын және алмастырылмайтын аминқышқылдардың кең спектрі бар, бұл олардың функционалдық тағам өнімдерінің компененттері ретінде әлеуетті биологиялық құндылығын көрсетеді.

Зерттеу нәтижелері бойынша, таңқурай ұнтағын қарақат ұнтағымен салыстырғанда зерттелген аминқышқылдарының көпшілігі бойынша жоғары көрсеткіштерге ие. Ең айқын айырмашылықтар аргинин (0,451±0,180 көрсеткіші 0,382±0,153% көрсеткішіне айырмашылық байқалса, лизиннің (0,341±0,116% көрсеткіші 0,310±0,106%) валиннің көрсеткіші (0,423±0,169% қарсы 0,287±0,115%), серин (0,479±0,124% көрсеткішіне 0,310±0,081% және

аланин (0,571±0,148% көрсеткішіне қарсы 0,326±0,085% болатын құрамы байқалады. Осы амин қышқылдарының мөлшерлерінің жоғары болуы таңқурай жидегінің ұнтағының ақуыздық және метаболитикалық құндылығының жоғары екендігін көрсетеді.

Айта кету керек, лизин – дәнді дақылдардан алынған өнімдерінде шектеулі аминқышқылдарының бірі, ал таңқұрай ұнтағында оның концентрациясы солыстырмалы түрде жоғары, бұл ингредиентті ұннан жасалатын өнімдерде қолдану кезінде мағызды болып табылады. Лейцин мен изолейциннің (0,442±0,115%) және валиннің (0,423±0,169%) көп мөлшерде болуы таңқурай ұнтағының дайын өнімдердің ақуыздық құрамын толықтырудағы әлеуетін көрсетеді.

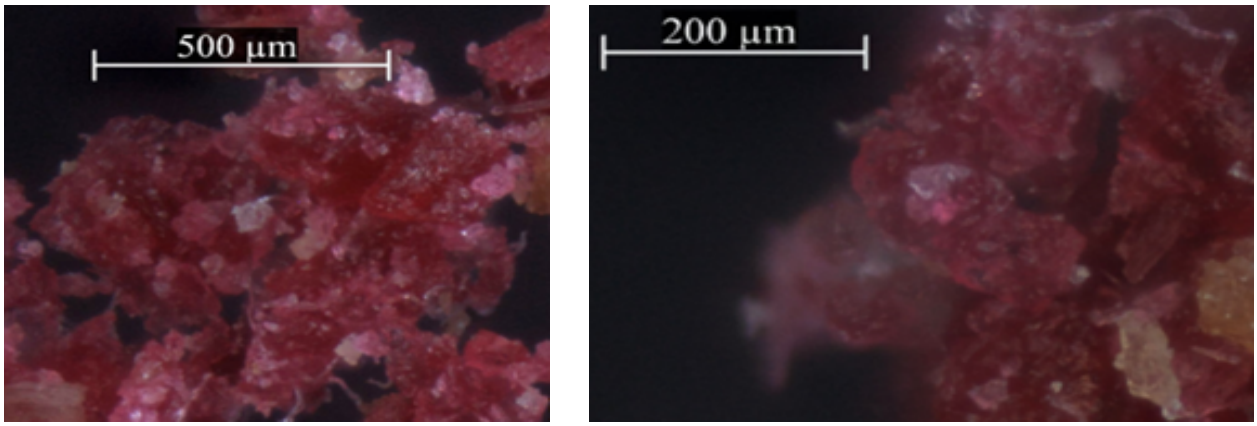
Қарақат ұнтағы, керісінше, метионин (0,103±0,035 %) және фенилаланин (0,366±0,110%) құрамында таңқурай ұнтағына қарағанда сәл жоғары. Бұл аминқышқылдар ақуыз синтезінде, метаболизмді реттеуде және ароматикалық қосылыстардың түзілуінде маңызды рөл атқарады, бұл дайын өнімдердің сапасына оң әсер етуі мүмкін.

Пролиннің мөлшері екі үлгіде де шамамен бірдейде (0,396-0,398%) бұл ақуыз компанентерінің құрылымдық қасиеттерінің ұқсастығын көрсетеді. Глицин мне сериннің болуы ақуыздың функционалдық қасиеттерінің ұқсастығын көрсететді. Глицин мен сериннің болуы ақуыздың функционалдық қасиеттерін, соның ішінде су ұқстау қабілетін және өнімдердің текстурасын қалыптастыруға қатысуын жақсартады.

Жалпы, алынған нәтижелер жидек ұнтақтары физиологиялық тұрғыдан маңызды аминқышқылдарды қамтитын және дәстүрлі ұндық шикізаттың аминқышқылдық профилін толықтыра алатынын көрсетеді, бұл дайын өнімдердің ақуыздарының биологиялық толықтығын арттырады. Осылайша, жидек ұнтақтарын композиттік қоспалар мен ұннан жасалатын өнімдер құрамына енгізу ақуыздардардың аминқышқылдық спектірін кеңейтумен қатар олардың биологиялық және функционалдық құндылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Құрғақ ұнтақтардың микроқұрылымын талдауы – алынған өнімнің морфологиялық ерекшеліктерін анықтап, кептіру параметрлерінің жасушалық құрылымның сақталуына әсерін бағалауға мүмкіндік беретін маңызды кезең. Белгілі болғандай, бөлшектердің формасы, кеуекті құрылымды болады, фракция көлемі және беттің сипаты ерігіштік, су ұстамдылық қабілеті, төгілуге қабілеттілік және биологиялық белсенді қосылыстарды ұстап тұру сияқты қасиеттермен тікелей байланысты.

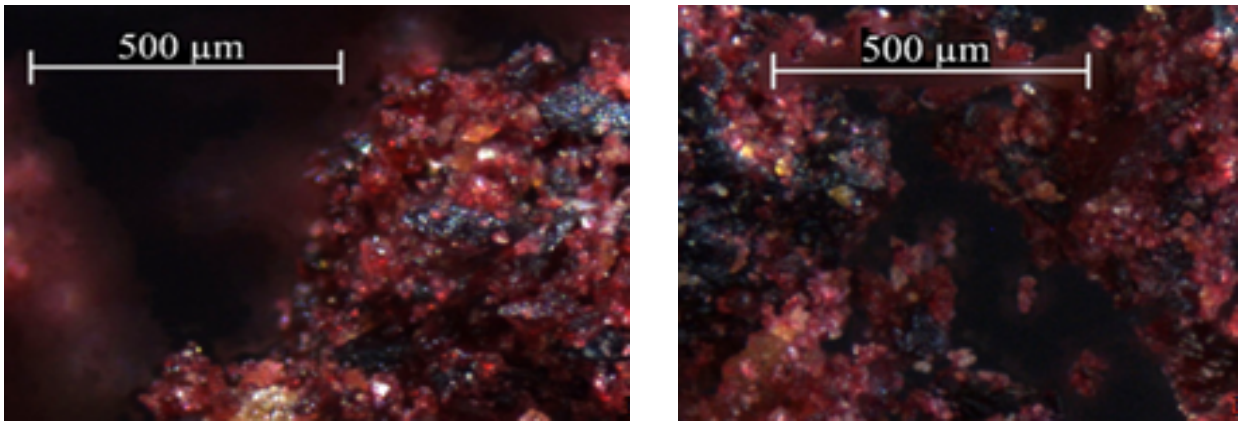
1-суретте таңқурай ұнтағының микроқұрылымдары көрсетілген. Таңқурай ұнтағы ұсақ дисперсті құрылымымен ерекшеленеді: бөлшектердің орташа көлемі 150-300 мкмдөңгелектілік коэффициенті 0,70-0,80. Кеуектілігі өте жоғары (45%-дейін), бұл ұнтақты тез суландуға және жылдам еріп кетуіне мүмкіндік береді.



1-сурет. Таңқурай ұнтағының микроқұрылымы, 5х және 10х ұлғайтқышы

1-ші суреттен көрінетіндей, бөлшектер бос құрылымға және дөңгелек формаға ие, бұл ұнтақұтың қамырда біркелкі таралуын қамтамасыз етеді және ерігіштігін жақсартады.

Қарақат ұнтағы бөлшектерінің көлемі бойынша кең ауқымға ие ()200- 700 мкм) және тығыз агрегаттар түзеді. Кеуектілік 20-300 %, дөңгелектілік коэффициенті 0,50-0,60. Осы деректерден байқалатын негізгі ерекшелік: таңқурай ұнтағы ұсақ, жеңіл және жақсы ергіш құрылымымен сипатталса, қарақат ұнтағы көлемді, тығыз және, аз кеуекті құрылымға ие, бұл оның қамырда таралуы қасиетіне және ерігіштігіне әсер етеді.



2-сурет. Қарақат ұнтағының микроқұрылымы, ұлғайтқышы 5х

4-кесте. Жидек дақылдарының құрғақ ұнтақтарының микроқұрылымдарының морфометриялық көрсеткіштері

Үлгілер	Ұнтақтардың орташа өлшемдері, мкм	Өлшемдердің диапазондары, мкм	Дөңгелектік коэффициенті	Кеуектілік%	Құрылымдардың ерекшелігі
Таңқурайдың құрғақ ұнтағы	150-300	400	0,70-0,80	45	Ұсақ бөлшектері агрегирленген, құрылымы кеуекті
Қарақаттың құрғақ ұнтағы	200-700	700	0,50-0,60	20-30	Агрегаттары тығыз,фрагменттері нығыздалған, пигментациясы өте жоғары

Сурет 2 ден көрініп тұрғандай, бөлшектер тығыз және біркелкі емес құрылымға ие, кей жерлерде беттің қатаюы байқалады, бұл карамелизациясына және антициандардың жоғары концентрациясына байланысты.

Зертелген ұнтақтардың микроқұрылымдарының сандық сипаттамаларын жүйелеу мақсатында бөлшектердің орташа көлемі, дөңгелектілік коэффициенті және салыстырмалы кеуектілік құрылымы есептеледі. Нәтижелер 4- кестеде келтірілген.

Морфометриялық сипаттамаларды талдау (4-кесте) келтірілді,жидет ұнтақтарының ұсақ өлшемдері (таңқурай мен қарақат) олардың жоғары дисперстілігімен ерекшеленіп олардың ерігіштік қасиеттерін жақсартады, бұл фенолдық

қосылыстардың сақталуын қамтамасыз ететін жоғары кеуектілігімен ерекшеленеді.

Қорытындылар. Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде конвективті кептіру әдісімен алынған таңқурай мен қарақат ұнтақтарының жоғары тағамдық, биологияялық және технологиялық құндылыққа ие екені анықталды, бұл оларды ұннан жасалатын кондитерлік өнімдер технологиясында қолданудың орындылығын негіздейді.

Таңқурай ұнтағының ақуыз бен май мөлшерінің жоғары екені, сондай-ақ, жоғары дисперстілігі мен кеуектілігі оның жақсы сулануын және қамыр жүйесінде біркелкі таралуын қамтамасыз ететіні тәжірибелер негізінде дәлелденді.

Қара қарақат ұнтағы майда еритін суда еритін антиоксидаттардың алдыңғы қатарлы негізгі көзі болып табылатыны анықталды, олардың мөлшері тиісінше 0,42-±0,003 және 2,10±0,047 мг/г деңгейіне жетеді, бұл өнімдердің биологиялық құндылығы мен тотығу тұрақтылығының артуына ықпал етеді.

Аминқышқылдылық құрамды талдау зерттелген ұнтақтарда алмастырылатын және алмастырылмайтын аминқышқылдарының кешені бар екенін көрсетті. Таңқурай ұнтағы лизин, валин, ленйцин серин жәнек аланин мөлшерінің жоғары болуымен ерекшеленеді, бұл оның жоғары ақуыздық және функционалдық құндалаығын дәлелдейді.

Микроқұралымдық зерттеулер ұнтақтардың морфологиялық ерекшеліктері бастапқы шикізаттың түріне және кептіру жағдайларына тәуелді екенін көрсетті

Таңқұрай ұнтағының жоғары кеуектілігі мен ұсақ дисперсті құрылымы оның технлогиялық қасиеттерін жақсартса, қара қарақат ұнтағының тығызырақ құрылымы биоллогиялық белсенді қосылыстардың ықпалына әсер етеді.

Физика-химиялық антиоксидаттық, аминқышқылдық және құрылымдық сипаттамалардың кешенді бағасы жидек дақылдары ұнтақтарын ұннан жасалатынын кондитерлік өнімдерді байыту және олардың тағамдық әрі биологиялық құндылығын арттыру мақсатында функционалдық ингредиентитер ретәінде қолданудың болашағы жатыр.

Алынған нәтижелер бойынша ұсақ ұнтақтардың тұтынушылық қасиеттері жақсартылған және функционалдық бағыттағы печенье мен пряник өнімдерінің жаңа рецептураларын әзірлеу кезінде пайдалануы мүмкін.

Қаржыландыру. *Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары мин-ситрлігінің Ғылым комитеті тарапынан IRN №BR24993031 Ғылыми – Техникалық Бағдарламасы бойынша «Табиғи антиоксиданттармен және биологиялық белсенді заттармен байытылған күнделікті рационға арналған пайдалы тағам өнімдерін дайындау технологиясын әзірлеу» бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру (ПЦФ) аясында қаржыландырылды.*

Әдебиеттер

1. Krajewska A., Dziki D. Entrichment of cookies with fruits and their by-products: chemical composition, andioxidant properties, and sensory changes//Molecules. -2023. -28(10): 4005. DOI 10.3390/molecules28104005.

2. Raszkowska E., et al. The use of blackcurrant pomace and erythritol to optimase the functional properties of shortbread cookies//Scientific Reports. -2024. -Vol.14: 3788. DOI 10/1038/s41598-024-54461-7.

3. De Santis D., Ferri S., Rossi A., Frisoni R., Modesti M. Shortbread cookies reformulation by raspberry powder enrichment: functional and sensory aspects// International Journal of Food Science and Technology. -2024. -Vol.59 (10). - P.7560-7569. DOI 10/1111/ijfs.17526.

4. Nour V., Blejan A.M, Codina G.G. Use of bilberry and blackcurrant pomace powders as Blackcurrant pomace powders as functional ingrediens in cookies // Applied Science. -2025. -Vol.15(10): 5247. DOI

10.3390/app15105247.

5. Michalska A., et.al. Effect of different drying techniques on physical properties of blackcurrant pomace powders // LWT Food Sci Technol. -2017. -Vol.77.-P.114-121. DOI 10/1016/j.lwt.2016.12.008.

6. Sadowskaa A, et.al. Properties and microstructure of blackcurrant powders prepared using a new method of fluidized-bed jet milling and drying versus other drying methods//CyTA - Journal of Food. -2019. -Vol. 17(1). -P.439-446. DOI10.1080/19476337.2019.1596985.

7. Azman E.M., et.al. Effect of dehydrations on phenolic compounds and antioxidant activity of blackcurrant (Ribes nigrum L.) pomace //International Journal of Food Science and Technology. -2021. -Vol.56(2). - P.600-607. DOI 10.1111/ijfs.14762.

8. Mildner- Szkudlarz S., et.al. Physical and bio Ctive properties of muffins enriched with raspberry and cranberry pomace powder: A Promising Application of Fruit By-Products Rich in Biocompounds //Plant Foods for Human Nutrition. -2016. -71. -P.165-173. DOI 10/1007/s11130-016-0539-4.

9. Gornas P., et.al. The impact of different baking conditions on the stability of extractable polyphenols in muffins enriched byfruit pomace//LWT. -2016. -Vol.65 P.946-953. DOI 10/1016/j/lwt.2015.09.029.

10. Lau K.Q., et al. Utilization of vegetable and fruit by-products asfunctional ingredientsin foods: a review //Frontiers in Nutrition. -2021. -Vol.8:661693. DOI 10.3389/fnut.2021.661693.

11. Kumar H., et.al. Selected fruit pomaces: nutritional profile, health benefits, and applications in functional foods and feeds //Current Research in Food Science. -2024. -Vol.9: 100791. DOI 10.1016/j.crfs.2024.100791.

12. Федина П.А., Яшин А.Я., Черноусова Н.И. Определение антиоксидантов в продуктач растительного происхождения амперометрическим методом. //Химия растительного сырья - 2010. - № 2. -С.91-97.

13. Idouraine A., Kohlhepp E.A., Weber C.W. Nutrient composition of eight lines of naked seed pumkin (Cucurbita pepo L.)// Journal of Agricultural and Food Chemistry. -1996. -Vol.44. P.721-724. DOI 10.1021/jf950630y.

14. Kim M.Y., Kim E.J, Kim Y.N., Choi C., Lee B-H. Comparison of chemical compositions and nutritive values of varions pumkin species and parts // Nutrition research and practice. -2012. - 6(1). -P.21-27. DOI 10.4162/nrp.2012.6.1.21.

15. Brzezowska J., Wojdylo A., Nowicka P., Turkiewicz I.P., Tracz K., Michalsla Ciechanowska A. How do the phenolics and amino acids affect the antioxidant, antidiabetic and antiglycation properties of selected fruit powders? //LWT. -2023. -Vol.189: 115454. DOI 10.1016/j.lwt.2023.115454.

References

1. Krajewska A., Dziki D. Entrichment of cookies with fruits and their by-products: chemical composition, andioxidant properties, and sensory changes//Molecules. -2023. -28(10): 4005. DOI 10.3390/molecules28104005.

2. Raszkowska E., et al. The use of blackcurrant pomace and erythritol to optimase the functional properties of shortbread cookies//Scientific Reports. -2024. -Vol.14: 3788. DOI 10/1038/s41598-024-54461-7.

3. De Santis D., Ferri S., Rossi A., Frisoni R., Modesti M. Shortbread cookies reformulation by raspberry powder enrichment: functional and sensory aspects// International Journal of Food Science and Technology. -2024. -Vol.59 (10). –P.7560-7569. DOI 10/1111/ijfs.17526.

4. Nour V., Blejan A.M, Codina G.G. Use of bilberry and blackcurrant pomace powders as Blackcurrant pomace powders as functional ingrediens in cookies // Applied Science. -2025. -Vol.15(10): 5247. DOI 10.3390/app15105247.

5. Michalska A., et.al. Effect of different drying techniques on physical properties of blackcurrant pomace powders // LWT Food Sci Technol. -2017. -Vol.77. -P.114-121. DOI 10/1016/j.lwt.2016.12.008.

6. Sadowskaa A, et.al. Properties and microstructure of blackcurrant powders prepared using a new method of fluidized-bed jet milling and drying versus other drying methods//CyTA - Journal of Food. -2019. -Vol. 17(1). -P.439-446. DOI 10.1080/19476337.2019.1596985.

7. Azman E.M., et.al. Effect of dehydrations on phenolic compounds and antioxidant activity of blackcurrant (Ribes nigrum L.) pomace //International Journal of Food Science and Technology. -2021. -Vol.56(2). - P.600-607. DOI 10.1111/ijfs.14762.

8. Mildner- Szkudlarz S., et.al. Physical and bio Ctive properties of muffins enriched with raspberry and cranberry pomace powder: A Promising Application of Fruit By-Products Rich in Biocompounds //Plant Foods for Human Nutrition. -2016. -71. -P.165-173. DOI 10/1007/s11130-016-0539-4.

9. Gornas P., et.al. The impact of different baking conditions on the stability of extractable polyphenols in muffins enriched byfruit pomace//LWT. -2016. -Vol.65 P.946-953. DOI 10/1016/j/lwt.2015.09.029.

10. Lau K.Q., et al. Utilization of vegetable and fruit by-products asfunctional ingredientsin foods:a review //Frontiers in Nutrition. -2021. -Vol.8:661693. DOI 10.3389/fnut.2021.661693.

11. Kumar H., et.al. Selected fruit pomaces: nutritional profile, health benefits, and applications in functional foods and feeds //Current Research in Food Science. -2024. -Vol.9: 100791. DOI 10.1016/j.crfs.2024.100791.

12. Fedina P.A., Jashin A.Ja., Chernousova N.I. Opredelenie antioksidantov v produktach rastitel’ nogo proishozhdenija amperometricheskim metodom. //Himija rastitel’ nogo syr’ ja - 2010. - № 2. -S.91-97 [in Russian]

13. Idouraine A., Kohlhepp E.A., Weber C.W. Nutrient composition of eight lines of naked seed pumkin (Cucurbita pepo L.)// Journal of Agricultural and Food Chemistry. -1996. -Vol.44. P.721-724. DOI 10.1021/jf950630y.

14. Kim M.Y., Kim E.J, Kim Y.N., Choi C., Lee B-H. Comparison of chemical compositions and nutritive values of varions pumkin species and parts // Nutrition research and practice. -2012. - 6(1). -P.21-27. DOI 10.4162/nrp.2012.6.1.21.

15. Brzezowska J., Wojdylo A., Nowicka P., Turkiewicz I.P., Tracz K., Michalsla Ciechanowska A. How do the phenolics and amino acids affect the antioxidant, antidiabetic and antiglycation properties of selected fruit powders? //LWT. -2023. -Vol.189: 115454. DOI 10.1016/j.lwt.2023.115454.

Сведения об авторах

Омаралиева А.М. - кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: aigul-omar@mail.ru;

Ботбаева Ж.Т. - кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: zhanar.b.t88@gmail.com;

Хастаева А.Ж. - PhD, ассоциированный профессор Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: gera_or@mail.ru;

Бектурганова А.А. - кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: 1968al1@mail.ru;

Агедилова М.Т. - кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и биз-

неса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: amt5@yandex.ru;

Рахимжанова А.Р. - магистр технических наук, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: r.ayagoz@mail.ru;

Аубакирова А.К. - магистр технических наук, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: alfiyakabylovna@gmail.com.

Information about the authors

Omaraliyeva A.M. - candidate of technical sciences, Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: aigul-omar@mail.ru;

Botbayeva Zh.T. - candidate of technical sciences Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhanar.b.t88@gmail.com;

Khastayeva A.Zh. - PhD, associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: gera_or@mail.ru;

Bekturganova A.A. - candidate of technical sciences Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: 1968al1@mail.ru;

Agedilova M.T. - candidate of chemical sciences, Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: amt5@yandex.ru;

Rakhimzhanova A.R. - master of technical sciences, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: r.ayagoz@mail.ru;

Aubakirova A.K. - master of technical sciences, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: alfiyakabylovna@gmail.com.

МРНТИ 65.29.03 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1339**

ПОЛБА ҰНЫНЫҢ ФИЗИКО-ХИМИЯЛЫҚ САПАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН ЗЕРТТЕУ

М.Е. Сейсеналы✉, М.П. Байысбаева, Д.А. Шаншарова

Алматы Технологиялық Университеті, Алматы, Қазақстан

✉ *Корреспондент-автор: makpal-97_97@mail.ru*

Бұл мақалада полба ұнының физика-химиялық сапалық көрсеткіштері «Руно» және «1127-7» сұрыптары негізінде зерттелді. Зерттеудің мақсаты-полба дәні мен ұнының химиялық құрамы, биологиялық құндылығы және технологиялық қасиеттерін салыстырмалы түрде бағалап, оларды тағам өндірісінде тиімді қолдану мүмкіндіктерін анықтау. Зерттеу нәтижелері бойынша «Руно» сұрыбының дәніндегі крахмал мөлшері 47,93 % болып, «1127-7» сұрыбымен (45,03 %) салыстырғанда жоғары екені анықталды, бұл оның энергия құндылығының басым екенін көрсетеді. Ақуыз мөлшері екі сұрыпта да жоғары деңгейде сақталып, тиісінше 17,24 % және 17,43 % құрады. Глютен мөлшері «1127-7» сұрыбында 35 %, ал «Руно» сұрыбында 31 % болды, бұл сұрыптардың технологиялық бағытталуының әртүрлі екенін дәлелдейді. Ұнның тарту ірілігіне байланысты химиялық құрамының өзгеруі анық байқалды. Ірі тартылған ұнда күлділік пен талшық мөлшері жоғары болып, «1127-7» сұрыбында күлділік 4,21 %, талшық 6,84 % деңгейіне жетті. Орташа тартылған ұн қоректік және технологиялық қасиеттердің оңтайлы теңгерімімен сипатталды, ал ұсақ тартылған ұнда глютен мөлшері жоғарылағанымен, биологиялық құндылық төмендеді. Аминқышқылдық құрамды талдау ірі тартылған полба ұнының биологиялық құндылығы жоғары екенін көрсетті. Әсіресе «1127-7» сұрыбында лизин мен триптофан мөлшерінің жоғары болуы тағамдық артықшылық береді. Витаминдік құрам бойынша «Руно» сұрыбында В тобы витаминдері, ал «1127-7» сұрыбында Е витамині (12,81 мг/100 г) басым болды. Желімше көрсеткіштері полба ұнының бидай ұнына қарағанда жоғары екенін көрсетті: желімше мөлшері 37,45-38,24 %, созылғыштығы 21-23 % аралығында болды. Қорытындылай келе, полба ұны функционалдық және наубайханалық мақсатта қолдануға жарамды, жоғары тағамдық құндылыққа ие перспективалы шикізат болып табылады.

Түйін сөздер: полба ұны, физика-химиялық көрсеткіштер, аминқышқылдық құрам, витаминдер, желімше сапасы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МУКИ ПОЛБЫ

М.Е. Сейсеналы✉, М.П. Байысбаева, Д.А. Шаншарова

Алматинский Технологический Университет, Алматы, Казахстан,
e-mail: makpal-97_97@mail.ru

В данной статье исследованы физико-химические показатели качества полбяной муки на примере сортов «Руно» и «1127-7». Цель исследования заключалась в сравнительной оценке химического состава, биологической ценности и технологических свойств зерна и муки полбы, а также в определении возможностей их эффективного использования в пищевой промышленности. Результаты исследования показали, что содержание крахмала в зерне сорта «Руно» составило 47,93 %, что выше по сравнению с сортом «1127-7» (45,03 %), и свидетельствует о его более высокой энергетической ценности. Содержание белка в обоих сортах находилось на высоком уровне и составило соответственно 17,24 % и 17,43 %. Количество клейковины у сорта «1127-7» достигало 35%, тогда как у сорта «Руно»-31%, что указывает на различную технологическую направленность сортов. Установлено, что изменение степени помола существенно влияет на химический состав муки. В муке крупного помола отмечалось повышенное содержание зольности и пищевых волокон, при этом у сорта «1127-7» зольность достигала 4,21 %, а содержание клетчатки-6,84%. Мука среднего

помола характеризовалась оптимальным соотношением пищевой и технологической ценности, тогда как мука мелкого помола, несмотря на более высокое содержание клейковины, обладала пониженной биологической ценностью. Анализ аминокислотного состава показал, что мука крупного помола из полбы отличается высокой биологической ценностью. Особенно у сорта «1127-7» отмечено повышенное содержание лизина и триптофана, что повышает его пищевую значимость. По витаминному составу сорт «Руно» был более богат витаминами группы В, тогда как сорт «1127-7» отличался высоким содержанием витамина Е (12,81 мг/100 г). Показатели клейковины свидетельствуют о преимуществах полбяной муки по сравнению с пшеничной: содержание клейковины составило 37,45-38,24 %, а ее растяжимость 21-23 %. В целом полбяная мука является перспективным сырьем с высокой пищевой ценностью и может эффективно использоваться для производства функциональных и хлебобулочных изделий.

Ключевые слова: мука полбы, физико-химические показатели, аминокислотный состав, витамины, качество клейковины.

STUDY OF THE PHYSICOCHEMICAL QUALITY INDICATORS OF SPELT FLOUR

M.E. Seisenaly✉, M.P. Baysbayeva, D.A. Shansharova

Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: makpal-97_97@mail.ru

This article investigates the physicochemical quality indicators of spelt flour using the “Runo” and “1127-7” varieties as examples. The aim of the study was to comparatively evaluate the chemical composition, biological value, and technological properties of spelt grain and flour, as well as to determine the possibilities for their effective use in the food industry. The research results showed that the starch content in the grain of the “Runo” variety was 47.93%, which is higher than that of the “1127-7” variety (45.03%), indicating its greater energy value. The protein content in both varieties was high, amounting to 17.24% and 17.43%, respectively. The gluten content of the “1127-7” variety reached 35%, while that of the “Runo” variety was 31%, demonstrating differences in the technological orientation of the varieties. It was established that the degree of milling has a significant effect on the chemical composition of the flour. Coarse-milled flour was characterized by a higher ash and dietary fiber content; in particular, the ash content of the “1127-7” variety reached 4.21%, while fiber content was 6.84%. Medium-milled flour showed an optimal balance between nutritional and technological properties, whereas fine-milled flour, despite its higher gluten content, was characterized by reduced biological value. Analysis of the amino acid composition demonstrated that coarse-milled spelt flour possesses a high biological value. Especially in the “1127-7” variety, increased levels of lysine and tryptophan were observed, which enhances its nutritional significance. In terms of vitamin composition, the “Runo” variety was richer in B-group vitamins, while the “1127-7” variety was distinguished by a high content of vitamin E (12.81 mg/100 g). The gluten characteristics indicate the advantages of spelt flour compared to wheat flour: gluten content ranged from 37.45 to 38.24%, and gluten extensibility was 21-23%. Overall, spelt flour is a promising raw material with high nutritional value and can be effectively used in the production of functional and bakery products.

Keywords: spelt flour, physicochemical indicators, amino acid composition, vitamins, gluten quality.

Кіріспе. Полба (*Triticum spelta L.*)-ежелгі бидай түрлерінің бірі болып табылады және қазіргі кезде функционалдық, экологиялық таза әрі қоректілігі жоғары өнімдер өндіруде маңызды шикізат көзі ретінде қарастырылуда [1]. Полба ұны қазіргі жұмсақ бидай ұнымен салыстырғанда ақуызға, диеталық талшықтарға, минералды элементтерге және антиоксиданттық қосылыстарға бай келеді. Осы ерекшеліктері оның тағамдық құндылығын арттырып, диеталық және профи-

лактикалық бағыттағы өнімдер өндіруге кең мүмкіндік береді [2].

Полба ұнының химиялық құрамында калий, фосфор, магний, кальций, темір, мырыш және марганец элементтері басым болады [1]. Бұл минералдар зат алмасу процестерінде, қан түзілу жүйесінде және ферменттік реакцияларда маңызды рөл атқарады. Полба дәнінің минералдық құрамы сорт ерекшелігіне, өсу жағдайына және ұнтақтау дәрежесіне байланысты өзгеріп отыратыны анықталған. Тұтас ұн үлгілерінде ақ ұнға қарағанда микроэлементтер мөлшері жоғары деңгейде сақталатыны көрсетілген [3].

Полба ұны ақуыздың жоғары мөлшерімен және ерекше желімше құрылымымен сипатталады. Оның глютендік кешені жұмсақ бидайға қарағанда әлсіздеу болғанымен, биологиялық құндылығы жоғары болып келеді [3]. Көмірсу құрамындағы крахмал фракцияларының ерекшелігіне байланысты полба ұнынан дайындалған өнімдердің гликемиялық индекс көрсеткіші төмен. Сонымен қатар, тағамдық талшықтардың едәуір мөлшері ас қорыту жүйесінің жұмысын жақсартып, қан құрамындағы глюкоза деңгейін реттеуге оң әсер етеді [2, 11].

Полба ұнының физика-химиялық және реологиялық қасиеттері де ерекше болып табылады. Оның су сіңіру қабілеті, желімше түзу қасиеті және желімдену температурасы дәстүрлі бидай ұнынан өзгешелеу келеді. Ұн бөлшектерінің өлшемі кішірейген сайын су сіңіру қабілеті артып, тұтқырлығы да жоғарылайтыны анықталған [4]. Бұл көрсеткіштер қамырдың құрылымына және дайын өнімнің көлемі мен кеуектілігіне тікелей әсер етеді.

Полба ұнының наубайханалық қасиеттеріндегі кейбір кемшіліктерді жою мақсатында биопроцессинг тәсілдері кеңінен қолданылуда. Биопроцессинг барысында микроорганизмдер мен ферменттердің әсерінен ақуыздардың, полисахаридтердің және фенолдық қосылыстардың құрылымы өзгеріске ұшырайды [5]. Мұндай өңдеуден өткен полба ұны қосылған өнімдердің көлемі ұлғайып, үгінді құрылымы жұмсарып, кеуектілігі жақсаратыны анықталған. Сонымен қатар антиоксиданттық белсенділік пен фенолдық қосылыстардың биоқолжетімділігінің артатыны көрсетілген [5].

Полба ұнының биологиялық белсенді қосылыстар құрамында фенолдық қышқылдар, флавоноидтар және токоферолдар едәуір мөлшерде кездеседі. Аталған қосылыстар организмдегі тотығу-тотықсыздану процестерін реттеп, жасушаларды бос радикалдардың зиянды әсерінен қорғауға қабілетті. Зерттеулер нәтижесінде полба ұнындағы антиоксиданттық белсенділік қазіргі бидай ұнына қарағанда 1,5-2 есе жоғары екендігі анықталған [6,7]. Полба дәніндегі тағамдық талшықтардың негізгі бөлігін ерімейтін целлюлоза, гемицеллюлоза және бета-глюкандар құрайды. Бұл компоненттер ішек моторикасын жақсартып, ішек микрофлорасының тепе-теңдігін сақтауға ықпал етеді. Сонымен қатар тағамдық талшықтардың холестерин деңгейін төмендетуге және семіздік пен қант диабетінің алдын алуға оң әсер ететіні дәлелденген [8,9].

Полба ұнының липидтік фракциясы да жоғары биологиялық құндылыққа ие. Оның құрамында қанықпаған май қышқылдары, әсіресе линоль және олеин қышқылдары басым келеді. Бұл май қышқылдары жүрек-қантамыр жүйесінің қызметін жақсартып, атеросклероздың даму қаупін төмендетеді [10]. Полба дәнінің аминқышқылдық құрамы да ерекше назар аударарлық. Лизин, метионин, треонин және валин сияқты алмастырылмайтын аминқышқылдары мөлшері жұмсақ бидаймен салыстырғанда жоғары болып келеді. Бұл полба ұны негізінде дайындалған өнімдердің ақуыздық биологиялық құндылығын арттырады [11].

Полба ұнының технологиялық қасиеттері оны әртүрлі тағам өндірісінде, атап айтқанда нан, макарон, кондитерлік және диеталық өнімдер өндірісінде кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. Дегенмен таза полба ұнынан дайындалған қамырдың газ ұстау қабілеті төмендеу болғандықтан, ол көбінесе жұмсақ бидай ұнымен қоспа түрінде пайдаланылуда [12,13]. Соңғы жылдары полба ұнын экструзиялық өңдеу, ультрадыбыстық әсер ету, ферменттік модификациялау сияқты заманауи технологиялар көмегімен өң-

деу бағыттары қарқынды дамуда. Мұндай өңдеулер полба ұнының реологиялық қасиеттерін жақсартып қана қоймай, оның биологиялық белсенді заттарының сақталуын арттырады [14,15].

Жалпы алғанда, полба ұны жоғары тағамдық, биологиялық және технологиялық құндылыққа ие перспективалы шикізат көзі болып табылады. Оның химиялық құрамы мен физика-химиялық қасиеттерін терең зерттеу отандық функционалдық және профилактикалық тағам өнімдерін өндіру үшін ғылыми негіз қалыптастыруға мүмкіндік береді [16].

Материалдар мен әдістер. Бұл зерттеуде негізгі шикізат ретінде Қазақ егіншілік және өсімдік шаруашылығы ғылыми-зерттеу институтында селекциялық әдістер арқылы алынған полба (*Triticum spelta L.*) дәндерінің екі түрлі селекциялық үлгісі пайдаланылды. Олар:

- **«Руно» сұрыпы**-жоғары бейімделгіштік қасиеттерімен, тұрақты өнімділігімен және биохимиялық құрамының тұрақтылығымен ерекшеленетін перспективалы линия;

- **«1127-7» сұрыпы**-зертханалық және өндірістік сынақтарда жоғары нан пісіру сапасын көрсеткен селекциялық материал.

Аталған сұрыптар талдауға дейін стандарттелған жағдайларда сақталып, бастапқы өңдеу сатыларынан (тазалау, қоспалардан арылту, калибрлеу және уақытша сақтау) өткізілді. Дәндер зертхана жағдайында +18.+20 °С температурада және салыстырмалы ылғалдылығы 60-65 % болатын ортада сақталды.



a **b** **c**

1-сурет. - ***a - ұсақ тартылған ұн, b - орташа тартылған ұн, c - ірі тартылған ұн***

Зерттеу нысаны ретінде полба ұны алынды. Полба дәндерінен ұн алу процесі зертханалық жағдайда Chopin Technologies SD-1 Laboratory Mill диірменінде жүргізілді. Ұнтақтау алдында дәндер қоспалардан тазартылып, ылғалдылығы 13-14 % деңгейіне дейін тұрақтандырылды. Диірменнің жұмыс режимі 10 000 айн/мин ротор жылдамдығында жүзеге асырылды. Ірі дисперсті фракцияны алу үшін саңылау диаметрі 1000 мкм електер қолданылды; орташа дисперсті фракция 500 мкм електер арқылы алынды; ал ұсақ дисперсті фракцияны қалыптастыру үшін 250 мкм електер қолданылды. Осылайша ұнтақтау параметрлерін (ротор жылдамдығы, електер диаметрі және өңдеу ұзақтығы) реттеу арқылы бөлшек өлшемі бойынша ірі, орташа және ұсақ дисперсті полба ұнының фракциялары қалыптастырылды. Алынған ұн бөлшектік құрамы бойынша шартты түрде үш фракцияға бөлінді:

- ірі тартылған ұнтақ (ірі бөлшектер);

- орташа тартылған ұнтақ;

- ұсақ тартылған ұнтақ (ұнтақталған фракция).

Полба ұнының аминқышқылдық құрамын анықтау үшін капиллярлы электрофорез әдісі

ГОСТ 32195-2013 стандартына сәйкес жүргізіледі. Бұл стандарт тағам өнімдеріндегі бос және байланысқан аминқышқылдарының мөлшерін жоғары дәлдікпен анықтауға арналған капиллярлы электрофорез әдісінің жалпы талаптарын, сынаманы дайындау және талдау жүргізу тәртібін сипаттайды.

Полба ұны құрамындағы В тобы витаминдерінің мөлшері МЕМСТ 31483-2012 стандарты бойынша, ал Е витаминінің мөлшері МЕМСТ 54634-2011 талаптарына сәйкес анықталды. Аталған стандарттар зертханалық талдауларды бірізділікпен жүргізуге және нәтижелерді салыстыруға мүмкіндік береді.

Алынған эксперименттік деректер статистикалық әдістермен өңделді. Әрбір тәжірибе кемінде үш рет қайталанып жүргізілді. Зерттеу нәтижелері бойынша орташа арифметикалық мән ($\bar{x}$) және стандарттық ауытқу (SD) есептелді. Нәтижелердің сенімділігі $p \leq 0,05$ деңгейінде бағаланды. Деректер орташа мән ± стандартты ауытқу түрінде берілген (M ± SD), $n = 3$.

Нәтижелер және талқылау. Полба дәнінің, ұнының сапалық көрсеткіштерін анықтау кезінде жүргізілген зерттеулердің жалпы нәтижелері мен олардың ғылыми тұрғыдағы маңызын қарастыратын боламыз. Полба ұнының негізгі физико-химиялық көрсеткіштері бағаланды. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері полба ұнын қолданудың технологиялық мүмкіндіктерін және оның функционалдық қасиеттерін жалпы сипаттауға мүмкіндік береді.

Кесте 1 деректері полба дәнінің «Руно» және «1127-7» сорттарының физика-химиялық сапа көрсеткіштерінде айтарлықтай айырмашылықтар бар екенін көрсетеді. «Руно» сортының крахмал мөлшері 47,93 % болып, «1127-7» сортына (45,03 %) қарағанда жоғары екені байқалады, бұл оның энергия құндылығының басым екенін көрсетеді. Ал ылғалдылық көрсеткіші «1127-7» сортында (9,59 %) сәл жоғары, бұл оның сақтау тұрақтылығына белгілі бір дәрежеде әсер етуі мүмкін. Ақуыз мөлшері екі сортта да жоғары деңгейде болып, тиісінше 17,24 % және 17,43 % құрады, бұл полбаның жоғары тағамдық және биологиялық құндылығын дәлелдейді.

1-кесте. Полба дәнінің физико-химиялық сапа көрсеткіштері

Полба дәнінің сұрыптары	Крахмал, %	Шөгінді, %	Ылғалдылық, %	Ақуыз, %	Глютен,%	Талшық, %
Полба **«Руно» сорты**	47,93±0,023	78±0,014	9,13±0,045	17,24±0,052	31±0,022	29,05±0,12
Полба **«1127-7» сорты**	45,03±0,025	75±0,019	9,59±0,039	17,43±0,057	35±0,025	30,45±0,15

Глютен мөлшері бойынша «1127-7» сорты (35 %) «Руно» сортына (31 %) қарағанда басым екені анықталды, бұл оның нан өнімдері үшін технологиялық тұрғыдан тиімді екенін көрсетеді. Ал талшық мөлшері «1127-7» сортында 30,45 %, «Руно» сортында 29,05 % деңгейінде болып, екі сорттың да асқорытуға пайдалы функционалдық қасиеттері жоғары екенін дәлелдейді. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер полба дәнінің екі сортының да жоғары тағамдық, технологиялық және функционалдық қасиеттерге ие екенін және оларды ашымал өндірісінде тиімді қолдануға болатынын көрсетеді.

Кесте 2 деректері полба ұнының химиялық құрамы оның тарту ірілігі мен сорттық ерекшеліктеріне тікелей тәуелді екенін көрсетті. Жалпы алғанда, екі сұрыпта да ірі тартылған ұн химиялық және биологиялық тұрғыдан ең бай нұсқа болып табылды, ал ұсақ тартылған ұн тазалану дәрежесі жоғары болғанымен, қоректік заттар мөлшері төмен нұсқа ретінде сипатталды.

«Руно» сұрыбында ірі тартылған ұн күлділік (2,42 %), май (3,41 %), талшық (3,38 %) және ақуыз (17,75 %) мөлшері бойынша ең жоғары көрсеткіштерді көрсетті. Бұл оның қабықша

бөліктерін көбірек қамтитынын және функционалдық құндылығының жоғары екенін дәлелдейді. Орташа және ұсақ тартуда аталған көрсеткіштердің төмендеуі байқалып, ең төмен мәндер ұсақ тартылған ұнда тіркелді. Осыған байланысты «Руно» сұрыбы үшін ірі тартылған ұн ең тиімді нұсқа болып табылады.

2-кесте. Әр түрлі іріліктегі полба ұнының химиялық құрамы

Полба дәнінің сұрыптары	Тарту ірілігі	Күлділігі, %	Май, %	Талшық, %	Ылғалдылық, %	Ақуыз, %	Глютен, %
Полба **«Руно» сұрыпы**	ірі	2,42±0,015	3,41±0,032	3,38±0,025	12,73±0,12	17,75±0,21	27,1±0,21
	орташа	1,34±0,011	2,96±0,034	0,48±0,021	12,06±0,09	13,63±0,18	24,00±0,18
	ұсақ	0,66±0,013	2,55±0,033	0,96±0,027	12,93±0,11	12,60±0,16	23,02±0,16
Полба «1127-7» сұрыпы	ірі	4,21±0,018	3,32±0,037	6,84±0,023	14,64±0,15	17,91±0,24	16,2±0,24
	орташа	1,96±0,014	2,75±0,035	1,51±0,026	11,76±0,08	14,07±0,19	13,1±0,19
	ұсақ	0,57±0,011	2,24±0,031	0,87±0,022	14,42±0,13	11,61±0,15	21,1±0,15

«1127-7» сұрыбында бұл үрдіс одан да айқын көрінді. Ірі тартылған ұнда күлділік (4,21 %) мен талшық мөлшерінің (6,84 %) айтарлықтай жоғары болуы бұл сұрыптың қабықшаға бай екенін және диеталық бағыттағы өнімдер үшін тиімді екенін көрсетеді. Алайда, осы нұсқада глютен мөлшерінің ең төмен деңгейде (16,2 %) болуы оның таза наубайханалық мақсатта қолданылуын шектеуі мүмкін. Керісінше, ұсақ тартылған «1127-7» ұны глютен мөлшері бойынша (21,1 %) ең жоғары мән көрсетті, бұл оны технологиялық тұрғыдан тиімді етеді, бірақ қоректік заттар мөлшері төмендеу болып келеді.

Тарту ірілігін салыстыра отырып, ірі тартылған ұн-функционалдық және диеталық құндылығы жоғары нұсқа, орташа тартылған ұн-қоректік пен технологиялық қасиеттер арасындағы оңтайлы теңгерім, ал ұсақ тартылған ұн-технологиялық (глютенге бағытталған) тұрғыдан тиімді, бірақ биологиялық құндылығы төмендеу нұсқа екені анықталды.

Сұрыптар арасында салыстырмалы талдау «1127-7» сұрыбының күлділік пен талшық мөлшері бойынша басым екенін, ал «Руно» сұрыбының ақуыз және глютен көрсеткіштерінің тұрақтылығымен ерекшеленетінін көрсетті. Осылайша, функционалдық тағам өнімдері үшін «1127-7» сұрыбының ірі тартылған ұны, ал наубайханалық мақсатта «Руно» сұрыбының орташа және ұсақ тартылған ұны ең тиімді нұсқа болып табылады.

3-кесте. Полба ұнының тартылу ірілігіне байланысты аминқышқылдық құрамы

Көрсеткіш	Полба «Руно» сұрыпы			Полба «1127-7» сұрыпы		
Тарту ірілігі	ірі	орташа	ұсақ	ірі	орташа	ұсақ
Аргинин,%	0,94±0,04	0,91±0,03	0,76±0,03	1,15±0,15	0,91±0,04	0,67±0,02
Цистеин,%	0,34±0,01	0,33±0,01	0,32±0,01	0,38±0,02	0,34±0,01	0,32±0,01
Гистидин,%	0,40±0,02	0,38±0,02	0,36±0,01	0,47±0,02	0,39±0,02	0,33±0,01
Изолейцин,%	0,55±0,02	0,49±0,02	0,49±0,02	0,55±0,03	0,50±0,02	0,46±0,02

Лейцин,%	1,14±0,05	0,99±0,04	0,97±0,04	1,13±0,05	1,01±0,04	0,90±0,03
Лизин,%	0,56±0,02	0,52±0,02	0,42±0,02	0,66±0,03	0,48±0,02	0,36±0,01
Метионин,%	0,26±0,01	0,26±0,01	0,25±0,01	0,25±0,01	0,35±0,01	0,23±0,01
Метион+цистеин,%	0,59±0,02	0,57±0,02	0,56±0,02	0,64±0,03	0,59±0,02	0,55±0,02
Фенилаланин,%	0,72±0,03	0,62±0,02	0,62±0,02	0,71±0,03	0,63±0,02	0,59±0,02
Треонин,%	0,47±0,02	0,46±0,02	0,42±0,02	0,56±0,02	0,47±0,02	0,39±0,01
Валин,%	0,71±0,03	0,66±0,02	0,62±0,02	0,80±0,03	0,67±0,02	0,59±0,02
Триптофан,%	0,23±0,01	0,20±0,01	0,17±0,01	0,29±0,01	0,19±0,01	0,18±0,01

4-кесте. Полба ұнының витаминдік құрамы

Витамин түрі	**«Руно» сорты, мг/100 г**	**«1127-7» сорты, мг/100 г**
B_1 (тиамин)	0,112 ± 0,022	0,106 ± 0,021
B_2 (рибофлавин)	0,05 ± 0,021	0,03 ± 0,013
B_6 (пиридоксин)	0,11 ± 0,022	0,09 ± 0,018
B_3 (ниацин)	2,75 ± 0,55	2,63 ± 0,53
B_5 (пантотен қышқылы)	Анықталмаған	Анықталмаған
B_9 (фолий қышқылы)	0,015 ± 0,003	0,010 ± 0,002
E (токоферол)	2,48 ± 0,01	12,81 ± 0,01

Зерттеу нәтижелері полба ұнының аминқышқылдық құрамы оның тарту ірілігіне тікелей тәуелді екенін көрсетті. Екі сұрыпта да ірі тартылған ұн алмастырылмайтын аминқышқылдар бойынша ең бай нұсқа болып табылды, ал ұсақ тартылған ұн аминқышқылдар мөлшері ең төмен нұсқа ретінде сипатталды.

«Руно» сұрыбында ірі тартылған ұн аргинин, лейцин, валин және триптофан мөлшері бойынша басым болды. Бұл фракцияда аминқышқылдардың салыстырмалы түрде жоғары деңгейде сақталуы дәннің қабықша және алейрон қабатының көбірек сақталуымен байланысты. Орташа тартылған ұнда көрсеткіштердің біршама төмендеуі байқалғанымен, аминқышқылдық құрамның тепе-теңдігі сақталды, бұл оны биологиялық құндылық пен технологиялық қолайлылық арасындағы оңтайлы нұсқа ретінде сипаттауға мүмкіндік береді. Ұсақ тартылған «Руно» ұны аминқышқылдар мөлшері бойынша ең төмен деңгейде болып, биологиялық тұрғыдан тиімділігі төмен нұсқа екені анықталды.

«1127-7» сұрыбында аминқышқылдық құрам айқынырақ ерекшеленді. Ірі тартылған ұн аргинин, лизин, валин және триптофан мөлшері бойынша екі сұрып арасында да ең жоғары көрсеткіштерге ие болды, бұл осы нұсқаның биологиялық тұрғыдан ең басым екенін көрсетеді. Әсіресе лизин мен триптофан мөлшерінің жоғары болуы бұл сұрыптың тағамдық құндылығын арттырады, себебі бұл аминқышқылдар дәнді дақылдарда шектеуші болып табылады. Орташа тартуда аминқышқылдар деңгейі айтарлықтай төмендегенімен, метионин мөлшерінің салыстырмалы түрде артуы осы фракцияның белгілі бір технологиялық артықшылықтарын сақтайтынын көрсетеді. Ұсақ тартылған ұн барлық аминқышқылдар бойынша ең төмен көрсеткіштерге ие болып, тағамдық тұрғыдан ең тиімсіз нұсқа ретінде бағаланды.

Екі сұрыпты салыстырмалы талдау нәтижесінде «1127-7» сұрыбының ірі тартылған ұны

аминқышқылдық құрамы бойынша ең жоғары биологиялық құндылыққа ие нұсқа екені анықталды. Ал «Руно» сұрыбының ірі және орташа тартылған ұны аминқышқылдық құрамының тұрақтылығымен ерекшеленіп, практикалық қолдану үшін тиімді нұсқа ретінде бағаланды.Жалпы алғанда, аминқышқылдық құрамы тұрғысынан ірі тартылған полба ұны - ең басым және тиімді, орташа тартылған ұн – теңгерімді, ал ұсақ тартылған ұн - биологиялық құндылығы төмен нұсқа екені ғылыми тұрғыда дәлелденді.

Кесте 4 деректері полба ұнының «Руно» және «1127-7» сұрыптарының витаминдік құрамында айқын айырмашылықтар бар екенін көрсетті, бұл олардың тағамдық және функционалдық құндылығының әртүрлі бағытта қалыптасатынын дәлелдейді.

В тобы витаминдері бойынша «Руно» сұрыбы жалпы алғанда басым нұсқа болып табылады. Атап айтқанда, B_1 (тиамин), B_2 (рибофлавин), B_6 (пиридоксин) және B_9 (фолий қышқылы) мөлшері «Руно» сұрыпында жоғары деңгейде анықталды. Бұл витаминдер көмірсу, ақуыз және энергия алмасу процестерінде маңызды рөл атқаратындықтан, «Руно» сұрыбын күнделікті тағамдық рационды байыту үшін тиімді деп бағалауға болады. Ниацин (B_3) мөлшері екі сұрыпта да жоғары және шамалас деңгейде болғанымен, «Руно» сұрыбында сәл басымдық байқалады, бұл оның метаболизмдік белсенділігін арттырады.

Ал «1127-7» сұрыбы Е витамині (токоферол) бойынша айқын артықшылық көрсетті. Бұл сұрыпта токоферол мөлшерінің 12,81 мг/100 г дейін жетуі оның антиоксиданттық қасиетінің өте жоғары екенін көрсетеді. Осыған байланысты «1127-7» сұрыбы функционалдық, антиоксиданттық және профилактикалық бағыттағы өнімдер өндіру үшін ең тиімді нұсқа болып табылады. Е витаминінің жоғары болуы липидтердің тотығуын баяулатып, өнімнің сақтау тұрақтылығын арттыруға да ықпал етеді.

B_5 (пантотен қышқылы) екі сұрыпта да анықталмаған, бұл оның мөлшері қолданылған әдістің сезімталдық шегінен төмен екенін көрсетеді және сұрыптық айырмашылықты айқындауға мүмкіндік бермейді. Жалпы алғанда, витаминдік құрам тұрғысынан «Руно» сұрыбы - В тобы витаминдеріне бай, теңгерімді тағамдық нұсқа, ал «1127-7» сұрыбы-Е витамині бойынша басым, айқын функционалдық бағыттағы нұсқа болып табылады. Осылайша, полба ұнының әрбір сұрыбы витаминдік құрамы бойынша өзіндік артықшылықтарға ие және оларды тағам өнімдерінің мақсатты түрлерін өндіруде тиімді қолдануға болады.

5-кесте. Ұн үлгілеріндегі желімшенің мөлшері мен реологиялық қасиеттерінің салыстырмалы сипаттамасы

Ұн үлгілері	Желімшенің мөлшері, %	Желімшенің созылғыштығы,%
Бидай ұны	35,08±0,84	19±0,72
Полба **«Руно» сұрыпы**	38,24±1,02	23±0,83
Полба «1127-7» сұрыпы	37,45±0,91	21±0,88

Зерттеу нәтижелері (Кесте 5) бидай ұны мен полба ұнының желімше мөлшері мен созылғыштығы арасында айтарлықтай айырмашылықтар бар екенін көрсетті. Кесте мәліметтеріне сәйкес, жұмсақ бидай ұнындағы желімше мөлшері 35,08 % болса, бұл көрсеткіш полбаның «Руно» сұрыпында 38,24 %, ал «1127-7» сұрыпында 37,45 % деңгейінде анықталды. Яғни, полба ұнының екі сұрыбында да желімше мөлшері дәстүрлі бидай ұнына қарағанда жоғары екені байқалады.

Желімшенің созылғыштығы көрсеткіші де полба сұрыптарында анағұрлым жоғары мән көрсетті. Атап айтқанда, бидай ұнында бұл көр-

сеткіш 19 % болса, «Руно» сұрыбында 23 %, ал «1127-7» сұрыбында 21 % деңгейінде болды. Бұл полба ұнының желімшесі серпімдірек әрі созылуға төзімді екенін көрсетеді. Мұндай қасиет қамырдың құрылымдық тұрақтылығын арттырып, нан өнімдерінің көлемінің ұлғаюына және кеуектілігінің жақсаруына оң әсер етуі мүмкін. «Руно» сұрыбы желімше мөлшері мен оның созылғыштығы бойынша ең жоғары көрсеткіштерге ие болды. Бұл аталған сұрыптың наубайханалық қасиеттерінің жоғары екенін дәлелдейді. Ал «1127-7» сұрыбы да бидай ұнымен салыстырғанда жақсы нәтиже көрсеткенімен, «Руно» сұрыбынан сәл төмен деңгейде болды. Бұл айырмашылық сұрыптардың генетикалық ерекшеліктері мен ақуыздық құрамының әртүрлілігімен түсіндіріледі.

Желімшенің мөлшері мен оның созылғыштығын анықтаудың практикалық маңызы ұнның технологиялық қасиеттерін кешенді бағалауда ерекше рөл атқарады, себебі бұл көрсеткіштер қамырдың құрылым түзу қабілетін, газ ұстау қасиетін және дайын өнімнің сапасын (көлемі, кеуектілігі, серпімділігі) тікелей сипаттайды. Желімше мөлшері жоғары болған жағдайда қамырдың беріктігі артып, нан және макарон өнімдерінің құрылымы жақсарады, ал оның созылғыштығы қамырдың өңдеу кезіндегі икемділігін, қалыптау мен ашыту процестеріндегі тұрақтылығын анықтайды. Сондықтан аталған көрсеткіштерді анықтау ұнды мақсатты түрде қолдану бағыттарын (нан пісіру, кондитерлік немесе макарон өндірісі) негіздеуге, сондай-ақ шикізат сапасын бақылау мен технологиялық процестерді оңтайландыруға мүмкіндік береді. Осыған байланысты полба ұнын функционалдық және диеталық бағыттағы нан өнімдерін өндіруде тиімді шикізат ретінде қолдануға болатынын дәлелдейді.

Қорытынды.Жүргізілген зерттеу нәтижелері полба (*Triticum spelta L.*) ұнының «Руно» және «1127-7» сұрыптарының жоғары тағамдық, биологиялық және технологиялық құндылыққа ие екенін көрсетті. Полба дәндерінің физика-химиялық көрсеткіштерін талдау барысында екі сұрыпта да ақуыз мөлшерінің жоғары деңгейде (17,24-17,43 %) екені анықталып, олардың биологиялық құндылығын дәлелдеді. «Руно» сұрыбы крахмал мөлшері бойынша (47,93 %) басымдық көрсетсе, «1127-7» сұрыбы глютен мөлшері (35 %) және Е витаминінің жоғары деңгейімен (12,81 мг/100 г) ерекшеленді.

Ұнның тарту ірілігі оның химиялық құрамына айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Ірі тартылған ұнда күлділік, талшық, май, ақуыз және алмастырылмайтын аминқышқылдардың мөлшері жоғары болып, оның функционалдық және диеталық құндылығының басым екенін көрсетті. Ұсақ тартуға қарай бұл көрсеткіштердің 15-30 % аралығында төмендеуі байқалды.

Аминқышқылдық құрамды салыстырмалы талдау «1127-7» сұрыбының лизин, аргинин және валин мөлшері бойынша жоғары екенін, ал «Руно» сұрыбының лейцин мөлшерімен ерекшеленетінін көрсетті. Екі сұрыпта да алмастырылмайтын аминқышқылдардың оңтайлы арақатынасы сақталған.

Полба ұнының желімше мөлшері мен созылғыштығы бидай ұнына қарағанда жоғары болып, оның наубайханалық қасиеттерінің жақсы екенін дәлелдеді. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер полба ұнын жоғары ақуызды, функционалдық және диеталық бағыттағы тағам өнімдерін өндіру үшін перспективалы шикізат ретінде қолдануға болатынын ғылыми тұрғыда негіздейді.

Әдебиеттер

1. Sinkovič L., Tóth V., Rakszegi M., Pipan B. Elemental composition and nutritional characteristics of spelt flours and wholemeals//Journal of Elementology.-2023.-Vol.28(1).- P.27-39. DOI 10.5601/jelem.2022.27.4.2358.

2. Deyalage S. T., House J. D., Thandapilly S. J., Malalgoda M. Nutritional characteristics and physicochemical properties of ancient wheat species for food applications//Food Bioscience. - 2024.-Vol.

62:105397. DOI 10.1016/j.fbio.2024.105397.

3. Kulathunga J., Reuhs B. L., Zwinger S., Simsek S. Comparative Study on Kernel Quality and Chemical Composition of Ancient and Modern Wheat Species: Einkorn, Emmer, Spelt and Hard Red Spring Wheat//Foods.-2021.-Vol.10(4): 761. DOI 10.3390/foods10040761.

4. Wojciechowicz-Budzisz A.,Skřivan P., Sluková M., Švec I. et al. Comprehensive Characterization of Micronized Wholemeal Flours: Investigating Technological Properties across Various Grains.//Foods.-2024.-Vol.13(1): 39. DOI 10.3390/foods13010039.

5. Mencin M., Markanovič N., Mikulič Petkovšek et al. Bioprocessed Wholegrain Spelt Flour Improves the Quality and Physicochemical Characteristics of Wheat Bread.// Molecules .- 2023. -Vol.28(8):3428. DOI 10.3390/molecules28083428.

6. Dinu M., Whittaker A. et al. Ancient wheat species and human health: Biochemical and clinical implications//Nutritional biochemistry. -2018.-Vol.52.-P.1-9. DOI 10.1016/j.jnutbio.2017.09.001.

7. Horvat D., Šimić G., Drezner G., Lalić A., Ledenčan, et al. Phenolic Acid Profiles and Antioxidant Activity of Major Cereal Crops.//Antioxidants.- 2020.-Vol.9(6):527. DOI 10.3390/antiox9060527.

8. Warechowska, M., Anders, A., Warechowski, J. et al. The endosperm microstructure, physical, thermal properties and specific milling energy of spelt (Triticum aestivum ssp. spelta) grain and flour. //Sci Rep.-2023.-Vol.13:3629. DOI 10.1038/s41598-023-30285-9.

9. Kandić V. V. Nicolic, M. Simic, et al. Spelt wheat (Triticum spelta) and common bread wheat compared for nutritional contents and functional-technological properties//Chilean journal of agricultural research. -2023.-Vol.83(2). - P.146-158. DOI 10.4067/s0718-58392023000200146.

10. J.Wang E.,Chatzidimitroiou L. Wood, et al. Effect of wheat species (Triticum aestivum vs T. spelta), farming system (organic vs conventional) and flour type (wholegrain vs white) on composition of wheat Flour-Results of a retail survey in the UK and Germany-2. Antioxidant activity, and phenolic and mineral content//Food Chemistry:X.-2020.-Vol.6: 100091.DOI 10.1016/j.fochx.2020.100091.

11. J.Wang, M.Barancki, G.Hasanaliyeva et al. Effect of irrigation, fertiliser type and variety on grain yield and nutritional quality of spelt wheat (Triticum spelta) grown under semi-arid conditions//Food Chemistry.-2021.-Vol.358: 129826.DOI 10.1016/j.foodchem.2021.129826.

12. J.Wang, M.Baranski, R.Korkut, H. Kalee, L.Wood, P.Bilsborrow et al. Performance of Modern and Traditional Spelt Wheat (Triticum spelta) Varieties in Rain-Fed and Irrigated, Organic and Conventional Production Systems in a Semi-Arid Environment; Results from Exploratory Field Experiments in Crete, Greece.//Agronomy.- 2021.-Vol.11(5):890. DOI 10.3390/agronomy11050890.

13. Skrajda-Brdak M. et al. Phenolic nutrient composition and grain morphology of winter spelt wheat (Triticum aestivum ssp. spelta) cultivated in Poland //Quality Assurance and Safety of Crops & Foods.-2018.-Vol.10(3):1-12. DOI 10.3920/QAS2018.1267.

14. Rakszegi M., Tóth V., Mikó P. The place of spelt wheat among plant protein sources//Cereal Science.-2023.-Vol.114:103813. DOI 10.1016/j.jcs.2023.103813.

15. D.Rajnincova, Z. Galova, et al. Comparison of nutritional and technological quality of winter wheat (Triticum aestivum L.) and hybrid wheat (Triticum aestivum L. x Triticum spelta L.)//central European agriculture. -2018.-Vol.19(2). -P.437-452. DOI 10.5513/JCEA01/19.2.2146.

16. G. Frakolaki,V.Giannou, et al. Chemical characterization and breadmaking potential of spelt versus wheat flour//Cereal science.-2018.Vol.79.-P.50-56. DOI 10.1016/j.jcs.2017.08.023.

Авторлар туралы мәлімет

Сейсеналы М.Е.- PhD докторант, Алматы Технологиялық Университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: makpal-97_97@mail.ru;

Байысбаева М.П.-техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Алматы Технологиялық Университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: meruert_80@mail.ru;

Шаншарова Д.А.-т.ғ.д., профессор, Алматы Технологиялық Университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: dinara.shansharova@mail.ru.

Information about the authors

Seisenaly M.E.- PhD doctoral student, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: makpal-97_97@mail.ru;

Baysbayeva M.P.- Candidate of Technical Sciences, Professor, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: meruert_80@mail.ru;

Shansharova D.A.- Doctor of Technical Sciences, Professor, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: dinara.shansharova@mail.ru.

ҒТАМР 65.09.05 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1549**

БАЛЫҚ ӨНІМДЕРІНІҢ САПАСЫ МЕН ҚАУІПСІЗДІГІН НОРМАТИВТІК РЕТТЕУ ЖӘНЕ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ СТАНДАРТТАРМЕН ҮЙЛЕСТІРУ

[1]Д.Б. Курмангалиева, [1]А.А. Дарибаева, [1]Г.Т. Юсупова, [1]Ж.К. Шадьярова, [2]Г.Г. Жуматова

[1]С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті КеАҚ, Астана, Қазақстан,
[2]Х. Досмұхамедов атындағы Атырау университеті КеАҚ, Атырау, Қазақстан,

Корреспондент-автор: gauhar_20_90@mail.ru

Халықаралық деңгейде азық-түлік қауіпсіздігіне қойылатын талаптардың күшеюі жағдайында ұлттық нормативтік реттеу жүйелерін халықаралық стандарттармен үйлестіру өзекті мәселеге айналуда. Балық өнімдері, әсіресе ready-to-eat (RTE) санатына жататын өнімдер микробиологиялық қауіпсіздікке, суық тізбекті бақылауға және шикізаттың қадағалануына қатысты жоғары талаптармен сипатталады.

Зерттеудің мақсаты – Еуразиялық экономикалық одақ елдеріндегі балық өнімдерінің қауіпсіздігін нормативтік реттеу жүйесінің үйлесімділік деңгейін Еуропалық одақ талаптарымен және Codex Alimentarius халықаралық стандарттарымен салыстыра отырып бағалау.

Зерттеу барысында нормативтік құжаттарды салыстырмалы-құқықтық талдау, нормативтік талаптардың контент-талдауы, реттеуші блоктарды сараптамалық ранжирлеу, gap-талдау және нормативтік жүйенің үйлесімділігін интегралды бағалау әдістерін қамтитын ғылыми әдістер кешені қолданылды. Зерттеу шеңберінде ұлттық нормативтік жүйенің халықаралық талаптарға сәйкестік деңгейін сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік беретін IH-FISH (Index of Harmonization for Fish Safety Regulation) интегралды үйлесімділік индексінің моделі әзірленді.

Зерттеу нәтижелері нормативтік талаптардың ең жоғары үйлесімділік деңгейі микробиологиялық қауіпсіздік және өндірістің санитарлық талаптары саласында байқалатынын көрсетті. Сонымен қатар суық тізбекті цифрлық мониторингтеу, өнімнің қадағалану жүйелері және антифрод-бақылау механизмдері саласында елеулі айырмашылықтар анықталды. Интегралды үйлесімділік индексінің есептеулері ЕАЭО нормативтік жүйесінің халықаралық талаптарға сәйкестігі орташа деңгейде екенін көрсетті.

Алынған нәтижелер балық өнімдерінің қауіпсіздігін нормативтік реттеу жүйесін жетілдіруде, жеткізу тізбектерін цифрлық мониторингтеу механизмдерін дамытуда және өңделген балық өнімдерінің халықаралық нарықтағы экспорттық бәсекеге қабілеттілігін арттыруда қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: балық өнімдері, тағам қауіпсіздігі, стандарттарды үйлестіру, антифрод-бақылау, gap-талдау, HACCP.

НОРМАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ РЫБНОЙ ПРОДУКЦИИ И ГАРМОНИЗАЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМИ СТАНДАРТАМИ

[1]Д.Б. Курмангалиева, [1]А.А. Дарибаева, [1]Г.Т. Юсупова, [1]Ж.К. Шадьярова, [2]Г.Г. Жуматова

[1]НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина», Астана, Казахстан,
[2]НАО «Атырауский университет им. Х. Досмухамедова», Атырау, Казахстан,
e-mail: gauhar_20_90@mail.ru

В условиях усиления международных требований к безопасности пищевых продуктов особую актуальность приобретает гармонизация национальных систем нормативного регулирования с международными стандартами. Рыбная продукция, особенно изделия категории ready-to-eat (RTE), характеризуется повышенными требованиями к микробиологической безопасности, контролю холодовой цепи и прослеживаемости сырья.

Целью настоящего исследования является оценка уровня гармонизации нормативного регулирования безопасности рыбной продукции в странах Евразийского экономического союза с требованиями Европейского союза и международными стандартами Codex Alimentarius.

В работе использован комплекс научных методов, включающий сравнительно-правовой анализ нормативных документов, контент-анализ регуляторных требований, экспертное ранжирование регуляторных блоков, gap-анализ и метод интегральной оценки гармонизации нормативной системы. В рамках исследования была разработана модель интегрального индекса гармонизации IH-FISH (Index of Harmonization for Fish Safety Regulation), позволяющая количественно оценить степень соответствия национальной нормативной системы международным требованиям.

Результаты исследования показали, что наиболее высокий уровень гармонизации нормативных требований наблюдается в области микробиологической безопасности и санитарных требований производства. Существенные различия выявлены в сфере цифрового мониторинга холодовой цепи, систем прослеживаемости продукции и механизмов антифрод-контроля. Расчёт интегрального индекса гармонизации показал средний уровень соответствия нормативной системы ЕАЭС международным требованиям.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования системы нормативного регулирования безопасности рыбной продукции, развития механизмов цифрового мониторинга цепей поставок и повышения экспортной конкурентоспособности переработанных рыбных продуктов на международных рынках.

Ключевые слова: рыбная продукция, безопасность пищевых продуктов, гармонизация стандартов, антифрод-контроль, gap-анализ, HACCP.

REGULATORY FRAMEWORK FOR QUALITY AND SAFETY OF FISH PRODUCTS AND HARMONIZATION WITH INTERNATIONAL STANDARDS

[1]D. Kurmangaliyeva, [1]A. Daribayeva, [1]G. Yussupova✉, [1]Zh. Shadyarova, [2]G. Zhumatova

[1]NP JSC «S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University», Astana, Kazakhstan
[2]NP JSC «Atyrau University named after Khalel Dosmukhamedov» Atyrau, Kazakhstan
e-mail: gauhar_20_90@mail.ru

In the context of increasing international requirements for food safety, the harmonization of national regulatory systems with international standards has become particularly relevant. Fish products, especially ready-to-eat (RTE) products, are characterized by increased requirements for microbiological safety, cold chain control, and traceability of raw materials.

The aim of this study is to assess the level of harmonization of the regulatory framework for fish product safety in the countries of the Eurasian Economic Union with the requirements of the European Union and the international standards of Codex Alimentarius.

The study employed a комплекс of scientific methods, including comparative legal analysis of regulatory documents, content analysis of regulatory requirements, expert ranking of regulatory blocks, gap analysis, and the method of integral assessment of regulatory harmonization. Within the framework of the study, a model of the IH-FISH (Index of Harmonization for Fish Safety Regulation) integral harmonization index was developed, allowing a quantitative assessment of the compliance of national regulatory systems with international requirements.

The results of the study showed that the highest level of harmonization of regulatory requirements is observed in the field of microbiological safety and sanitary requirements of production. Significant differences were identified in the areas of digital monitoring of the cold chain, product traceability systems, and anti-fraud control mechanisms. The calculation of the integral harmonization index demonstrated a moderate level of compliance of the EAEU regulatory system with international requirements.

The obtained results can be used to improve the regulatory system for fish product safety, develop digital monitoring mechanisms for supply chains, and enhance the export competitiveness of processed fish products in international markets.

Keywords: fish products; food safety, harmonization of standards, anti-fraud control, gap analysis, HACCP.

Кіріспе. Соңғы онжылдықтарда әлемдік балық өнімдері өндірісі тұрақты өсім көрсетіп келеді, бұл аквакультураның белсенді дамуы, өңдеу технологияларының жетілдірілуі және жоғары тағамдық әрі биологиялық құндылығы бар өнімдерге тұтынушылық сұраныстың артуымен байланысты. Балық өнімдері әлемдік азық-түлік нарығы құрылымында маңызды орын алады және толыққұнды ақуыздың, полиқанықпаған май қышқылдарының және басқа да биологиялық белсенді компоненттердің маңызды көзі ретінде қарастырылады [1,2].

Балық өнімдерінің құрылымында ready-to-eat (RTE) санатына жататын өнімдер ерекше орын алады. Бұл өнімдер қосымша термиялық өңдеусіз тұтынылатындықтан, олардың микробиологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз етуге, өндірістің санитарлық жағдайларын бақылауға, сақтау мен тасымалдау кезіндегі температуралық режимдерді сақтауға, сондай-ақ шикізат пен дайын өнімнің қадағалануын қамтамасыз етуге жоғары талаптар қойылады [3,4].

Ферменттелген балық өнімдері күрделі микробиологиялық экожүйемен сипатталатын тағам өнімдерінің жеке санатын құрайды. Стерилизацияланған немесе термиялық өңдеуден өткен өнімдерден айырмашылығы, ферменттелген өнімдердің қауіпсіздігі тек өндірістің технологиялық параметрлерімен ғана емес, сонымен қатар микроорганизмдердің дамуын бақылауды, суық тізбектің сақталуын және шикізаттың шығу тегін бақылауды қамтитын нормативтік бақылау жүйесінің тиімділігімен анықталады [5,6].

Тилапия (Tilapia nilotica) әлемдік аквакультураның ең қарқынды дамып келе жатқан объектілерінің бірі болып табылады. Оның етінің жоғары биологиялық құндылығы, қолайлы аминқышқылдық құрамы және технологиялық әмбебаптығы бұл балықты әртүрлі өңделген балық өнімдерін өндіру үшін перспективалы шикізат ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Аквакультура өнімдерінің халықаралық саудасы артып отырған жағдайда тилапиядан алынатын өнімдердің халықаралық азық-түлік қауіпсіздігі талаптарына және әртүрлі елдердің нормативтік стандарттарына сәйкестігін қамтамасыз ету ерекше маңызға ие болуда [1-6].

Еуропалық одақтағы азық-түлік қауіпсіздігін реттеу жүйесі тәуекелге негізделген тәсілге және «фермадан тұтынушыға дейін» қағидатына негізделген. Бұл жүйе өндірістің гигиенасына қойылатын талаптарды, микробиологиялық қауіпсіздік критерийлерін, ресми бақылауды, өнімнің қадағалануын және сақтау мерзімін ғылыми негіздеуді қамтитын өнімнің бүкіл өндірістік-тасымалдау тізбегі бойынша кешенді бақылауды қарастырады. Бұл модель халықаралық деңгейде азық-түлік қауіпсіздігін реттеудің ең дамыған және тиімді жүйелерінің бірі болып саналады [7 - 10].

Еуразиялық экономикалық одақ елдерінде азық-түлік өнімдерінің қауіпсіздігін реттеу тұтынушылардың денсаулығын қорғауға және ортақ нарықта өнім айналымының бірыңғай ережелерін қалыптастыруға бағытталған техникалық регламенттер негізінде жүзеге асырылады. Негізгі нормативтік құжаттарға КО ТР 021/2011 «Тағам өнімдерінің қауіпсіздігі туралы», КО ТР 022/2011 «Тағам өнімдерінің таңбалануы туралы» және КО ТР 040/2016 «Балық және балық өнімдерінің қауіпсіздігі туралы» техникалық регламенттері жатады [10].

Алайда халықаралық сауданың дамуы және санитарлық-фитосанитарлық талаптардың күшеюі жағдайында ұлттық нормативтік талаптарды халықаралық стандарттармен және Codex Alimentarius ұсынымдарымен одан әрі үйлестіру қажеттілігі туындап отыр [3].

Заманауи зерттеулер әртүрлі елдердің нормативтік талаптарының формалды түрде ұқ-

сас болуы олардың іс жүзіндегі функционалдық сәйкестігін әрқашан қамтамасыз ете бермейтінін көрсетеді. Айтарлықтай айырмашылықтар бақылау жүйелерінің цифрландыру деңгейінде, зертханалық мониторингтің қарқындылығында, антифрод-бақылау механизмдерінің тиімділігінде және реттеуші органдардың азық-түлік қауіпсіздігі талаптарының бұзылуына жедел әрекет ету қабілетінде байқалуы мүмкін [5-7].

Осыған байланысты тағам қауіпсіздігін қамтамасыз етудің нормативтік жүйелерінің үйлесімділік деңгейін бағалаудың сандық құралдарын әзірлеу өзекті ғылыми міндеттердің бірі болып табылады. Мұндай құралдардың бірі ретінде нормативтік реттеудің әртүрлі элементтерін салыстыруға және ұлттық және халықаралық талаптар арасындағы негізгі реттеуші айырмашылықтарды анықтауға мүмкіндік беретін интегралды үйлесімділік индексі қолданылуы мүмкін [7-10].

Осы зерттеудің мақсаты - Еуропалық одақ талаптарымен және Codex Alimentarius халықаралық стандарттарымен салыстыру негізінде тилапиядан (Tilapia nilotica) алынатын өнімдерді қоса алғанда, балық өнімдерінің қауіпсіздігін нормативтік реттеудің үйлесімділік деңгейін бағалаудың интегралды моделін әзірлеу, негізгі реттеуші блоктар бойынша gap-талдау жүргізу және балық өнімдерінің қауіпсіздігін нормативтік қамтамасыз ету жүйесін жетілдіру бойынша ғылыми негізделген ұсынымдар қалыптастыру.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу нысаны ретінде Қазақстан Республикасындағы және Еуразиялық экономикалық одақ (ЕАЭО) елдеріндегі балық өнімдерінің сапасы мен қауіпсіздігін нормативтік реттеу жүйесі, сондай-ақ оның азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету саласындағы халықаралық талаптарға сәйкестік деңгейі қарастырылды. Ерекше назар балық өнімдерінің өндірістік-өткізу тізбегінің негізгі кезеңдерін реттейтін нормативтік механизмдерді талдауға аударылды. Бұл кезеңдерге шикізат өндірісі, өңдеу, сақтау, тасымалдау және дайын өнімді өткізу процестері кіреді.

Зерттеудің нормативтік-құқықтық негізін балық өнімдерінің қауіпсіздігін реттейтін халықаралық, өңірлік және ұлттық құжаттар құрады. Негізгі дереккөздер ретінде Codex Alimentarius стандарттары, Еуропалық одақтың нормативтік актілері, Еуразиялық экономикалық одақтың техникалық регламенттері, сондай-ақ Қазақстан Республикасының қолданыстағы нормативтік-құқықтық құжаттары пайдаланылды.

Атап айтқанда, зерттеу барысында келесі нормативтік құжаттарға талдау жүргізілді:

- ЕАЭО техникалық регламенті КО ТР 021/2011 «Тағам өнімдерінің қауіпсіздігі туралы»;

- ЕАЭО техникалық регламенті КО ТР 040/2016 «Балық және балық өнімдерінің қауіпсіздігі туралы»;

- ЕАЭО техникалық регламенті КО ТР 022/2011 «Тағам өнімдерінің таңбалануы туралы»;

- балық және балық өнімдерін өңдеу қауіпсіздігін реттейтін Codex Alimentarius халықаралық стандарттары;

- азық-түлік өнімдерінің гигиенасы, микробиологиялық қауіпсіздік критерийлері және ресми бақылау саласындағы Еуропалық одақ регламенттері.

Зерттеудің әдіснамалық негізін балық өнімдерінің қауіпсіздігін реттеудің қолданыстағы нормативтік жүйесін жүйелі бағалауға мүмкіндік беретін өзара толықтыратын ғылыми әдістер кешені құрады. Зерттеу барысында салыстырмалы-құқықтық талдау, нормативтік талаптарды жүйелік талдау, нормативтік құжаттардың контент-талдауы, сондай-ақ сараптамалық бағалау және нәтижелерді сандық интерпретациялау әдістері қолданылды.

Зерттеудің бірінші кезеңінде балық өнімдерінің қауіпсіздігін реттейтін нормативтік құжаттарға контент-талдау жүргізілді. Бұл кезең балық өнімдерін өндіру, сақтау және өткізу кезінде қойылатын негізгі талаптарды жүйелеуге мүмкіндік берді. Атап айтқанда, микробиологиялық қауіпсіздік критерийлері, тағам өнеркәсібі кәсіпорындарына қойылатын санитарлық-гигиеналық талаптар, суық тізбекті сақтау шарттары және мемлекеттік бақылау рәсімдері қа-

растырылды.

Екінші кезеңде халықаралық стандарттар мен ЕАЭО-ның қолданыстағы нормативтік жүйесі арасындағы ұқсастықтар мен айырмашылықтарды анықтауға бағытталған салыстырмалы талдау жүргізілді. Салыстыру балық өнімдерінің қауіпсіздігін реттеудің келесі негізгі бағыттары бойынша жүзеге асырылды:

- өнімнің микробиологиялық қауіпсіздігі;

- өндіріс және өңдеу гигиенасына қойылатын талаптар;

- сақтау және тасымалдау кезінде температуралық режимдерді және суық тізбекті бақылау;

- өнімнің қадағалануын қамтамасыз ету және шикізаттың шығу тегін сәйкестендіру;

- таңбалау және тұтынушыларды ақпараттандыру талаптары;

- мемлекеттік бақылау және инспекциялық қадағалау рәсімдері.

Ұлттық талаптардың халықаралық стандарттарға сәйкестік деңгейін сандық бағалау үшін нормативтік талаптардың үйлесімділігін интегралды бағалау әдісі қолданылды. Осы тәсіл шеңберінде ұлттық реттеу жүйесінің халықаралық стандарттар талаптарына сәйкестік деңгейін бағалауға мүмкіндік беретін IH-FISH (Index of Harmonization for Fish Safety Regulation) интегралды үйлесімділік индексінің моделі әзірленді.

Бағалау бірнеше негізгі реттеуші блоктар бойынша жүргізілді, олардың әрқайсысына халықаралық талаптарға сәйкестік деңгейіне байланысты балдық баға берілді.

Бағалау үшін үш деңгейлі шкала қолданылды:

0 - нормативтік жүйеде ұқсас талаптардың болмауы;

1 - халықаралық талаптарға ішінара сәйкестік;

2 - халықаралық стандарттарға толық сәйкестік.

Әрбір реттеуші блоктың салыстырмалы маңыздылығын анықтау үшін тағам қауіпсіздігі, стандарттау және нормативтік реттеу саласындағы мамандар қатысқан сараптамалық ранжирлеу әдісі қолданылды. Сараптамалық бағалау балық өнімдерінің қауіпсіздігін реттеу жүйесінің әртүрлі элементтерінің салмақтық коэффициенттерін анықтауға мүмкіндік берді.

Қосымша ретінде ЕАЭО-ның қолданыстағы реттеу жүйесі мен халықаралық стандарттар арасындағы нормативтік айырмашылық деңгейін сандық тұрғыдан анықтауға мүмкіндік беретін gap-талдау әдісі қолданылды. Бұл әдіс нормативтік реттеудің одан әрі үйлестіруді және жетілдіруді талап ететін ең проблемалық бағыттарын анықтауға мүмкіндік берді.

Алынған деректерді өңдеу және түсіндіру үшін зерттеу нәтижелерін жүйелеуге және балық өнімдерінің қауіпсіздігін нормативтік реттеу жүйесінің дамуындағы негізгі үрдістерді анықтауға мүмкіндік беретін сипаттамалық статистика әдістері қолданылды.

Кешенді әдіснамалық тәсілді қолдану балық өнімдерінің қауіпсіздігін реттеудің қолданыстағы жүйесін жан-жақты талдауға және оны азық-түлік қауіпсіздігінің халықаралық стандарттарымен үйлестіру жағдайында одан әрі жетілдірудің негізгі бағыттарын анықтауға мүмкіндік берді.

Нәтижелер және талқылау. Жүргізілген зерттеу балық өнімдерінің сапасы мен қауіпсіздігін нормативтік реттеудің қолданыстағы жүйесіне кешенді талдау жүргізуге және оның халықаралық стандарттармен үйлесімділік деңгейін анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу барысында Еуропалық одақтың нормативтік талаптары, Codex Alimentarius халықаралық стандарттары және Еуразиялық экономикалық одақтың техникалық регламенттері салыстырмалы түрде қарастырылды.

Талдау нәтижелері көрсеткендей, қарастырылған реттеу жүйелерінің барлығы азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етудің ортақ негізгі қағидаттарына негізделген. Мұндай қағидаттарға микробиологиялық қауіптердің алдын алу, өндірістің санитарлық-гигиеналық жағдайларын қамтамасыз ету, сапаны бақылау жүйелерін енгізу және тағам өнеркәсібі кәсіпорындарында ги-

гиеналық талаптарды сақтау жатады. Сонымен қатар нормативтік талаптардың нақтылану деңгейі мен оларды практикалық іске асыру механизмдері арасында айтарлықтай айырмашылықтар байқалады.

Балық өнімдерінің қауіпсіздігін нормативтік реттеудің ең дамыған жүйесі Еуропалық одақ елдерінде қалыптасқан. Еуропалық модель «фермадан тұтынушыға дейін» қағидатына негізделген және өнімнің өндірістік-өткізу тізбегінің барлық кезеңдерінде қауіпсіздігін кешенді бақылауды қарастырады. Бұл жүйеде өнімнің қадағалануына, сақтау мерзімінің ғылыми негізделуіне, цифрлық мониторинг жүйелеріне және тәуекелге негізделген мемлекеттік бақылауға ерекше көңіл бөлінеді.

Codex Alimentarius халықаралық стандарттары азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету бойынша жаһандық ұсынымдар жүйесін қалыптастырады. Бұл стандарттардың негізгі мақсаты – әртүрлі елдердің талаптарын үйлестіру және халықаралық саудада тағам өнімдерінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету. Ұсынымдық сипатта болғанымен, Codex стандарттары ұлттық нормативтік құжаттарды әзірлеу кезінде кеңінен қолданылады және азық-түлік қауіпсіздігін реттеудің заманауи жүйесін қалыптастыруда бағдар ретінде қызмет етеді.

Еуразиялық экономикалық одақ елдерінде балық өнімдерінің қауіпсіздігін реттеу өнімді өндіру, сақтау, тасымалдау және өткізуге қойылатын міндетті талаптарды белгілейтін техникалық регламенттер негізінде жүзеге асырылады. Негізгі нормативтік құжаттар ретінде КО ТР 021/2011 «Тағам өнімдерінің қауіпсіздігі туралы» және КО ТР 040/2016 «Балық және балық өнімдерінің қауіпсіздігі туралы» техникалық регламенттері қарастырылады. Бұл құжаттар балық өнімдерінің сапасы мен қауіпсіздігіне қойылатын негізгі талаптарды айқындайды.

Нормативтік талаптарды салыстырмалы талдау нәтижелері 1-кестеде көрсетілген. Кестеден көрініп тұрғандай, нормативтік жүйелер арасындағы ең жоғары үйлесімділік деңгейі өнімнің микробиологиялық қауіпсіздігі және өндірістің санитарлық талаптары саласында байқалады. ЕАЭО техникалық регламенттерінде патогенді микроорганизмдердің рұқсат етілген деңгейлері белгіленген және олар халықаралық стандарттар мен Еуропалық одақтың нормативтік талаптарымен салыстырмалы деңгейде.

Сонымен қатар өнімнің қадағалануын қамтамасыз ету, суық тізбекті бақылау және сақтау мерзімін ғылыми негіздеу салаларында белгілі бір айырмашылықтар анықталды. Еуропалық одақ елдерінде бұл талаптар анағұрлым егжей-тегжейлі регламенттелген және өнім қозғалысын бақылаудың цифрлық жүйелері мен заманауи мониторинг құралдарын енгізумен қатар жүреді.

Балық өнімдерінің әлемдік нарығында ерекше мәселе ретінде өнімді фальсификациялау жағдайлары қарастырылады. Бұған балық түрлерін ауыстыру, өнімнің шыққан елін дұрыс көрсетпеу және сақтау шарттарын бұзу сияқты заңбұзушылықтар жатады. Мұндай бұзушылықтардың алдын алу мақсатында Еуропалық одақ елдерінде шикізатты сәйкестендірудің заманауи әдістері, соның ішінде молекулалық-генетикалық талдау әдістері және өнімнің қадағалануын қамтамасыз ететін цифрлық жүйелер кеңінен қолданылады. Ал ЕАЭО-ның нормативтік жүйесінде мұндай механизмдер қазіргі уақытта даму кезеңінде. Нормативтік талаптарды салыстырмалы талдау нәтижелері 1-кестеде ұсынылған.

Кестеден көрініп тұрғандай, үйлесімділіктің ең жоғары деңгейі өнімнің микробиологиялық қауіпсіздігі және өндірістің санитарлық талаптары саласында байқалады. Орташа сәйкестік деңгейі суық тізбекті бақылау, өнімнің қадағалануын қамтамасыз ету және таңбалау талаптары саласында анықталды. Үйлесімділіктің ең төмен деңгейі антифрод-бақылау саласында байқалады, бұл балық өнімдерін фальсификациялаудың алдын алу механизмдерін одан әрі жетілдіру қажеттілігін көрсетеді. Реттеу жүйелері арасындағы нормативтік айырмашылықтарды неғұрлым нақты анықтау үшін gap-талдау жүргізілді, оның нәтижелері 2-кестеде ұсынылған.

1-кесте. Балық өнімдерінің қауіпсіздігіне қойылатын нормативтік талаптардың үйлесімділігін салыстырмалы талдау

Реттеуші блок	Еуропалық одақ	Codex Alimentarius	ЕАЭО	Үйлесімділік деңгейі
Микробиологиялық қауіпсіздік	Микробиологиялық қауіпсіздік критерийлері толық регламенттелген және тұрақты зертханалық бақылау жүргізіледі	Микробиологиялық критерийлер бойынша халықаралық ұсынымдар	Патогенді микроорганизмдердің рұқсат етілген деңгейлері белгіленген	Жоғары
Өндірістік гигиена	HACCP жүйесін міндетті енгізу және қатаң мемлекеттік бақылау	Тағам өнімдерінің гигиенасының жалпы қағидаттары	HACCP жүйесі кәсіпорындарда енгізілуде	Жоғары
Суық тізбекті бақылау	Температуралық режимдерді қатаң мониторингтеу және логистиканы цифрлық бақылау	Сақтау және тасымалдау температурасы бойынша ұсынымдар	Ішінара регламенттелген	Орташа
Өнімнің қадағалану жүйесі	Жеткізу тізбегінің барлық кезеңдерінде толық traceability жүйесі	Ұсынымдық талаптар	Қадағалану жүйесі ішінара енгізілген	Орташа
Өнімді таңбалау	Өнімді таңбалау және тұтынушыларды ақпараттандыру бойынша толық талаптар	Таңбалау бойынша жалпы ұсынымдар	Таңбалауға қойылатын негізгі талаптар белгіленген	Орташа
Антифрод-бақылау	Өнім түрін және шыққан елін алмастыруды бақылаудың дамыған жүйесі	Шектеулі ұсынымдар	Іс жүзінде жоқ	Төмен
Сақтау мерзімін валидациялау	Сақтау мерзімін ғылыми негізде міндетті түрде растау (shelf-life validation)	Сақтау мерзімдерін белгілеу бойынша ұсынымдар	Ішінара реттелген	Орташа

2-кесте. Нормативтік айырмашылықтардың gap-талдауы

Реттеуші блок	Салмақ коэффициенті	Сәйкестік деңгейі	Қорытынды
Микробиологиялық қауіпсіздік	0,25	2	0,50
Суық тізбек	0,15	1	0,15
Өнімнің қадағалану жүйесі	0,20	1	0,20
Антифрод-бақылау	0,10	0	0
Мемлекеттік бақылау	0,15	2	0,30
Сақтау мерзімін валидациялау	0,15	1	0,15

2-кесте деректері бойынша ең үлкен норласында байқалады, мұнда gap көрсеткішінің мативтік айырмашылық антифрод-бақылау самәні 2-ге тең. Бұл Еуропалық одақ талаптары

мен ЕАЭО-ның қолданыстағы нормативтік жүйесі арасында айтарлықтай айырмашылық бар екенін көрсетеді. Айтарлықтай айырмашылықтар сондай-ақ өнімнің қадағалануын қамтамасыз ету, суық тізбекті бақылау және сақтау мерзімін ғылыми негіздеу салаларында анықталды.

Нормативтік талаптардың үйлесімділік деңгейін сандық тұрғыдан бағалау үшін үйлесімділіктің интегралды индексі есептелді, оның нәтижелері 3-кестеде ұсынылған.

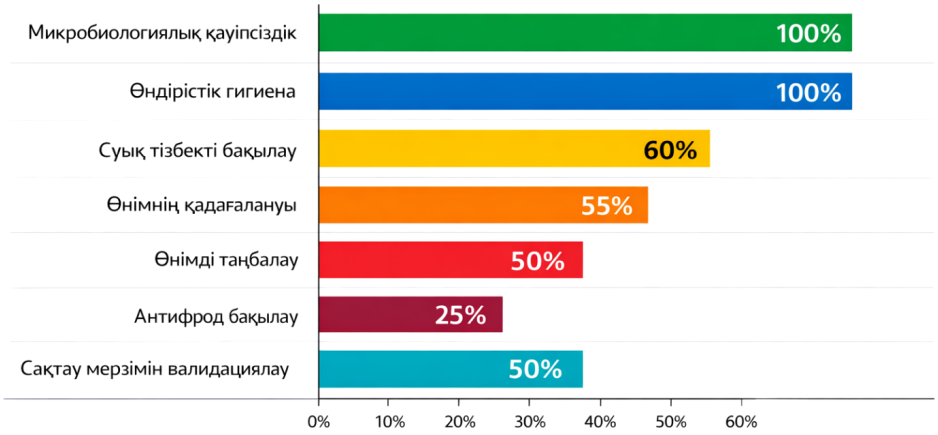
3-кесте. Нормативтік жүйенің үйлесімділігін интегралды бағалау

Реттеуші блок	Салмақ коэффициенті	Сәйкестік деңгейі	Қорытынды
Микробиологиялық қауіпсіздік	0,25	2	0,50
Суық тізбек	0,15	1	0,15
Қадағалану (traceability)	0,20	1	0,20
Антифрод-бақылау	0,10	0	0
Мемлекеттік бақылау	0,15	2	0,30
Сақтау мерзімін валидациялау	0,15	1	0,15

Жоғарыда үйлесімділіктің интегралды бағасына ең үлкен үлесті микробиологиялық қауіпсіздік және мемлекеттік бақылау көрсеткіштері қосады. Сонымен қатар антифрод-бақылау және өнімнің қадағалануын қамтамасыз ету салаларында салыстырмалы түрде төмен мәндер байқалады.

Үйлесімділіктің интегралды индексін есептеу нәтижелері ЕАЭО нормативтік жүйесінің халықаралық талаптарға сәйкестік деңгейін орташа деңгейде бағалауға болатынын көрсетті. Алынған индекс мәні қолданыстағы нормативтік жүйе жалпы алғанда халықаралық стандарттарға сәйкес келетінін, алайда реттеудің жекелеген элементтерін одан әрі жетілдіру қажеттігін көрсетеді.

Нормативтік талаптардың үйлесімділік деңгейінің графикалық көрінісі 1-суретте ұсынылған.



1-сурет. Нормативтік талаптардың үйлесімділік деңгейінің гистограммасы

Гистограммада микробиологиялық қауіпсіздік және өндірістің санитарлық талаптары саласында үйлесімділіктің ең жоғары деңгейі байқалатынын айқын көрсетеді. Сонымен қатар ең

үлкен айырмашылықтар антифрод-бақылау саласында анықталған, бұл жүргізілген gap-талдау нәтижелерін растайды.

Балық өнімдерінің қауіпсіздігін қамтамасыз етудің кешенді тәсілі 2-суретте ұсынылған, онда балық өнімдерінің қауіпсіздігін реттеу жүйесінің концептуалдық схемасы көрсетілген.



2-сурет. Балық өнімдерінің қауіпсіздігін реттеу жүйесінің концептуалдық схемасы

Суретте балық өнімдерінің қауіпсіздігін қамтамасыз етудің заманауи моделі өндірістік-өткізу тізбегінің барлық кезеңдерін - шикізатты өндіруден бастап соңғы тұтынушыға дейін – дәйекті бақылауға негізделген. Бастапқы кезеңде балықты аулау немесе оны аквакультура жағдайында өсіру жүзеге асырылады. Бұл кезең өндірістің экологиялық жағдайларын, су сапасын, жемшөп базасын және балық шикізатының ветеринариялық жағдайын бақылауды қамтиды.

Келесі кезең – шикізатты өңдеу. Бұл кезең балық шикізатын дайындау, оны ұсақтау, жартылай фабрикаттарды қалыптастыру және дайын өнім өндіру сияқты технологиялық операцияларды қамтиды. Осы кезеңде санитарлық-гигиеналық талаптарды сақтау және өндірістің технологиялық параметрлерін орындау ерекше маңызға ие.

Тағам өнімдерінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету жүйесінің негізгі элементі HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) жүйесін енгізу болып табылады. Бұл жүйе өндірістің барлық кезеңдерінде ықтимал биологиялық, химиялық және физикалық қауіптерді анықтауға, бағалауға және басқаруға бағытталған.

Бақылау жүйесінің маңызды құрамдас бөлігі – суық тізбектің үздіксіздігін қамтамасыз ету. Бұл балық өнімдерін сақтау және тасымалдау кезінде оңтайлы температуралық режимді сақтауға мүмкіндік береді. Температуралық талаптарды сақтау патогенді микроорганизмдердің дамуын болдырмаудың және өнім сапасын сақтаудың негізгі факторы болып табылады.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу балық өнімдерінің сапасы мен қауіпсіздігін нормативтік реттеу жүйесіне кешенді бағалау жүргізуге және оның азық-түлік қауіпсіздігі саласындағы халықаралық стандарттармен үйлесімділік деңгейін анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу барысында Еуропалық одақтың талаптары, Codex Alimentarius халықаралық стандарттары және Еуразиялық экономикалық одақтың техникалық регламенттері салыстырылды.

Зерттеу нәтижелері қарастырылған нормативтік жүйелердің азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етудің ортақ қағидаттарына негізделетінін көрсетті. Оларға микробиологиялық қауіптерді бақылау, өндірістің санитарлық-гигиеналық талаптарын сақтау және HACCP қағидаттарына негізделген азық-түлік қауіпсіздігін басқару жүйесін енгізу жатады. Сонымен бірге нормативтік талаптардың нақтылану деңгейі мен оларды практикалық іске асыру механизмдері ара-

сында елеулі айырмашылықтар байқалады.

Талдау нәтижелері нормативтік талаптардың ең жоғары үйлесімділігі өнімнің микробиологиялық қауіпсіздігі және өндірістің санитарлық талаптары саласында байқалатынын көрсетті. Сонымен қатар суық тізбекті бақылау, өнімнің қадағалану жүйелері, сақтау мерзімін ғылыми негіздеу және балық өнімдерінің фальсификациясының алдын алу механизмдерін реттеу салаларында айырмашылықтар анықталды.

Жүргізілген gap-талдау антифрод-бақылау және өнімнің цифрлық қадағалану жүйелері саласында ең үлкен нормативтік айырмашылықтар бар екенін көрсетті. IH-FISH (Index of Harmonization for Fish Safety Regulation) индексіне негізделген үйлесімділікті бағалаудың интегралды моделі ЕАЭО нормативтік жүйесінің халықаралық талаптарға сәйкестік деңгейін сандық тұрғыдан анықтауға мүмкіндік берді және ол орташа деңгейде екені анықталды.

Алынған нәтижелер суық тізбекті цифрлық мониторингтеу жүйелерін дамыту, өнімнің қадағалану жүйелерін жетілдіру және балық өнімдерінің фальсификациясына қарсы шараларды күшейту қажеттігін көрсетеді. Ұсынылған үйлесімділікті бағалау моделі азық-түлік қауіпсіздігін реттеудің ұлттық жүйелерінің тиімділігін талдау үшін, сондай-ақ балық өнімдерінің халықаралық нарықтағы экспорттық бәсекеге қабілеттілігін арттыру мақсатында қолданылуы мүмкін.

Әдебиеттер

1. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation Rome: FAO - 2022.-266 p. ISBN 978-92-5-136364-5. DOI 10.4060/cc0461en.

2. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in Action. Rome: FAO, 2024. - 264 p. ISBN 978-92-5-138763-4. DOI 10.4060/cd0683en.

3. FAO, WHO. Code of Practice for Fish and Fishery Products (CAC/RCP 52–2003) - Codex Alimentarius Commission. – Rome: FAO/WHO. –372 p. ISBN 978-92-4-001318-6

4. Yin M., Wang X. New strategies to improve the quality and safety of seafoods and the efficient utilization of their by-products // Foods. -2026.-Vol.15(2):190. DOI 10.3390/foods15020190.

5. Issa-Zacharia A., Msangi R., Mboya G. Chemical and microbiological quality of fish products: regulatory aspects // International Journal of Microbiology and Biotechnology. -2025.-Vol10(3). -P.73-90. - DOI 10.11648/j.ijmb.20251003.12.

6. Visciano P. Environmental contaminants in fish products: food safety issues and remediation strategies // Foods. - 2024. -Vol.13(21):3511. DOI 10.3390/foods13213511.

7. Ryder J., Karunasagar I., Ababouch L. (eds.). Assessment and Management of Seafood Safety and Quality: Current Practices and Emerging Issues – FAO Fisheries and Aquaculture Technical Rome: FAO, 2014. - 455 p. ISBN 978-92-5-107511-1

8. Eegulation (EC) No.178/2002 of the European Parliament and of the Council laying down the general principles and requirements of food law, establishing the European Food Safety Authority and laying down procedures in matters of food safety/ Official Journal L 31, 1 February 2002, pp.1-24.- Source: FAO, FAOLEX. URL: https://www.ecolex.org .- Date of address:-03.01.2026

9. Regulation (EC) No 852/2004 of the European parliament and of the council of 29 April 2004 on the hygiene of foodstuffs https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2004/852/oj/eng - Date of address:-03.01.2026.

10. O tehnicheskom reglamente Evrazijskogo jekonomicheskogo sojuza «O bezopasnosti ryby i rybnoj produkcii». Reshenie Soveta Evrazijskoj jekonomicheskoj komissii ot 18.10.2016 g. №162. https://adilet.zan.kz/rus/docs/H16EV000162 - Data obrashhenija:03.01.2026.

Авторлар туралы мәлімет

Курмангалиева Д.Б. - техника ғылымдарының докторы, профессор м.а., С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: d.kurmangaliyeva@kazatu.edu.kz;

Дарибаева А.А. - PhD докторанты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана., Қазақстан, e-mail: aigul_daribaeva@mail.ru; Юсупова Юсупова Г.Т. - PhD, аға оқытушы, «Көлік техника, технология және стандарттау, сертификаттау және метрология» ББББТ, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан, e-mail: gauhar_20_90@mail.ru;

Шадьярова Ж.К.- PhD, аға оқытушы, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: zhazirashadyarova@gmail.com;

Жуматова Г.Г. - экология магистрі, Халел Досмұхамедова атындағы Атырау университеті. Атырау, Қазақстан, e-mail: gulshat_zhumatova@mail.ru;

Information about the authors

Kurmangaliyeva D.- Doctor of Technical Sciences, Acting Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: d.kurmangaliyeva@kazatu.edu.kz

Daribayeva A. - PhD Doctoral Student, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: aigul_daribaeva@mail.ru;

Yussupova G. - PhD, Senior Lecturer, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; e-mail: gauhar_20_90@mail.ru;

Shadyarova Zh. - PhD, Senior Lecturer, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhazira_shadyarova@bk.ru

Zhumatova G.– Master of Ecology, H. Dosmukhamedova Atyrau University, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: gulshat_zhumatova@mail.ru.

МРНТИ 65.59.19 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1374**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИЩЕВОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОТЕРИ МАССЫ И ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТУШЕК ПТИЦЫ В ПРОЦЕССЕ ОХЛАЖДЕНИЯ И ХРАНЕНИЯ ПРИ БЛИЗКРИОСКОПИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

[1]Л.Б. Умиралиева✉, [2]М.А. Дибирасулаев, [2]Д.М. Дибирасулаев, [3]Л.Г. Стоянова, [1]С.С. Турлыбаева, [1]И.Д. Филатов

[1]ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности» Алматы, Казахстан,
[2]Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности - филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, Москва, Россия,
[3]МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ *Корреспондент-автор: l.umiraliyeva@rpf.kz*

В данной работе представлены результаты исследований по обоснованию оптимального состава пленкообразующих покрытий (ППС) для хранения охлажденного мяса птицы на основе моноглицеридов и молочной сыворотки с применением биоконсервантов. Основное внимание уделено оценке влияния пищевых покрытий на потери массы (усушку) мяса птицы в процессе охлаждения и последующего хранения при близкриоскопической температуре в течение 30 суток. Производственная апробация технологии проводилась на базе предприятия СПК «Медеу 55» (Туркестанская область). В ходе испытаний применялся состав, включающий молочную сыворотку, глицерин, органические кислоты (молочную и лимонную), а также бактериоцин гибридного штамма *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116 в качестве активного антимикробного компонента. Результаты испытаний показали, что внедрение данной технологии позволяет не только повысить микробиологическую безопасность продукции и продлить сроки её годности, но и существенно снизить естественную убыль массы тушек птицы. Дополнительно в течение 30 суток хранения изучалось влияние различных комбинаций ППС на общее микробное число (ОМЧ). В частности, сравнивалась эффективность применения состава на основе 0,1% низина «Nisin Pro» совместно с 1% желатином и 2% молочной кислотой и состава с использованием 0,1% культуральной жидкости штамма *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116.

Ключевые слова: мясо птицы, охлаждение, пищевые покрытия, потери массы, близкриоскопическая температура, микробиологические показатели, хранение мяса птицы.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FOOD COATING ON WEIGHT LOSS AND CHANGES IN MICROBIOLOGICAL PARAMETERS OF POULTRY CARCASSES DURING COOLING AND STORAGE AT NEAR-CRYOSCOPIC TEMPERATURE

[1]L.B. Umiraliyeva✉, [2]M.A. Dibirasulaev, [2]D.M. Dibirasulaev, [3]L.G. Stoyanova, [1]S.S. Turlybayeva, [1]I.D. Filatov

[1]Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry LLP, Almaty Kazakhstan
[2]All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry - branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Science, Moscow, Russia,
[3]Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia,
e-mail: l.umiraliyeva@rpf.kz

This study presents research results on justifying the optimal composition of edible film-forming coatings (EFC) for the storage of chilled poultry meat, based on monoglycerides and whey incorporated with biopreservatives. The primary focus is placed on evaluating the effect of edible coatings on the mass loss (shrinkage) of poultry during cooling and subsequent storage at sub-cryoscopic temperatures for a period of 30 days. Industrial validation of the technology was conducted at the ”Medeu 55” Agricultural Production Cooperative (Turkistan region). The tested formulation included whey, glycerin, organic acids

(lactic and citric), and a bacteriocin from the hybrid strain *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116 as an active antimicrobial agent. The results demonstrated that the implementation of this technology not only enhances the microbiological safety of the product and extends its shelf life but also significantly reduces the natural mass loss of poultry carcasses. Additionally, the impact of various EFC combinations on the total viable count (TVC) was studied over a 30-day storage period. Specifically, the efficacy of a 0.1% Nisin Pro-based composition combined with 1% gelatin and 2% lactic acid was compared to a formulation utilizing 0.1% culture liquid from the *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116 strain.

Keywords: poultry meat, cooling, edible coatings, weight loss, near-cryoscopic temperature, microbiological indicators, poultry storage

ЖАҚЫН КРИОСКОПИЯЛЫҚ ТЕМПЕРАТУРАДА САЛҚЫНДАТУ ЖӘНЕ САҚТАУ ҮДЕРІСІНДЕ ҚҰС ҰШАЛАРЫНЫҢ МАССА ЖОҒАЛТУЫ МЕН МИКРОБИОЛОГИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІНІҢ ӨЗГЕРУІНЕ ТАҒАМДЫҚ ҚАПТАМАНЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

[1]Л.Б. Умиралиева✉, [2]М.А. Дибирасулаев, [2]Д.М Дибирасулаев, [3]Л.Г. Стоянова, [1]С.С. Турлыбаева, [1]И.Д. Филатов

[1]"Қазақ қайта өңдеу және тамақ өнеркәсібі ғылыми-зерттеу институты" ЖШС, Алматы Қазақстан,
[2]Тоңазытқыш Өнеркәсібінің Бүкілресейлік Ғылыми-Зерттеу Институты - В.М. Горбатов атындағы Ресей Ғылым Академиясының Азық-Түлік жүйелері Федералды ғылыми-зерттеу орталығының филиалы Мәскеу, Рессей,
[3]М. В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті, Мәскеу, Рессей,
e-mail: l.umiraliyeva@rpf.kz

Бұл жұмыста биоконсерванттарды қолдана отырып, моноглицеридтер мен сүт сарысуы негізінде салқындатылған құс етін сақтауға арналған үлдір түзетін жабындардың (ҮТЖ) оңтайлы құрамын негіздеу бойынша зерттеу нәтижелері ұсынылған. Негізгі назар құс етін салқындату және одан әрі 30 тәулік бойы криоскопиялық температураға жақын жағдайда сақтау процесінде тағамдық жабындардың салмақ жоғалтуына (кебуіне) әсерін бағалауға аударылған. Технологияны өндірістік сынақтан өткізу «Медеу 55» АӨК (Түркістан облысы) базасында жүргізілді. Сынақтар барысында құрамында сүт сарысуы, глицерин, органикалық қышқылдар (сүт және лимон), сондай-ақ белсенді микробқа қарсы компонент ретінде *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116 гибридті штаммының бактериоцині бар композиция қолданылды. Сынақ нәтижелері бұл технологияны енгізу өнімнің микробиологиялық қауіпсіздігін арттыруға және оның жарамдылық мерзімін ұзартуға ғана емес, сонымен қатар құс ұшаларының табиғи салмақ жоғалтуын айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Қосымша 30 тәулік сақтау кезеңінде ҮТЖ-ның түрлі комбинацияларының жалпы микробтық санына (ЖМС) әсері зерттелді. Атап айтқанда, 1% желатин және 2% сүт қышқылымен бірге 0,1% «Nisin Pro» низині негізіндегі құрамның тиімділігі *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116 штаммының 0,1% культуралдық сұйықтығын қолданған құраммен салыстырылды.

Түйін сөздер: құс еті, салқындату, тағамдық қаптамалар, масса жоғалту, жақын криоскопиялық температура, микробиологиялық көрсеткіштер, құс сақтау.

Введение. Анализ научных публикаций по технологии холодильного консервирования мяса птицы показывает, что наряду с интенсификацией способов холодильной обработки, требующих значительных капитальных затрат на техперевооружение камер холодильников, одним из эффективных путей снижения потерь массы и сохранения качества является обработка поверхности продукта пищевыми пленкообразующими составами (ППС).

В основе массопереноса при охлаждении лежит механизм испарения влаги с поверхности продукта в воздушную среду с её последующей конденсацией на охлаждающих элементах оборудования. В случаях, когда испарение происходит из сложных растворов или затруднено наличием полупроницаемых барьеров (например, защитных пленок), традиционный коэффициент

испарения для чистой воды b_w заменяется на коэффициент сопротивления испарению.

Следовательно, охлаждение пищевых продуктов в негерметичной упаковке всегда сопровождается активным тепломассообменом, который влечет за собой не только снижение температуры, но и неизбежную потерю массы. Несмотря на это, именно охлаждение признано наиболее щадящим методом консервирования. В сравнении с другими способами обработки, оно оказывает минимальное воздействие на структуру продукта, позволяя максимально долго сохранять его исходную свежесть и товарный вид.

Проблема естественной убыли массы из-за испарения влаги наиболее критична для неупакованной продукции. Итогом такого обезвоживания становится неизбежное снижение качественных характеристик сырья. В качестве одного из наиболее эффективных решений выступает обработка мяса и птицы антимикробными пленками. Обладая высокими барьерными свойствами, такого вида покрытия минимизируют массообмен и удерживают влагу, что позволяет существенно продлить сроки годности и сохранить товарный вид продукта.

Анализ актуальных исследований в области мясной промышленности подтверждает, что потери веса и ухудшение микробиологических показателей остаются главными вызовами при хранении охлажденной птицы. Данные негативные процессы спровоцированы интенсивной миграцией влаги, деструкцией белковых соединений и активным ростом микрофлоры, включая сапрофитные и условно-патогенные микроорганизмы [1-10]. Несмотря на то, что использование температурного режима, близкого к точке замерзания (от -1 до +1 °С), эффективно замедляет биохимическую порчу продукции, применение подобных режимов требует внедрения дополнительных мер по защите поверхности мяса птицы [2].

Для повышения сохранности мяса перспективным направлением является применение съедобных покрытий (edible coatings). Создаваемые на основе природных полимеров - белков, полисахаридов и липидов - они образуют на поверхности продукта физико-химический барьер, который не только замедляет испарение влаги, но и препятствует окислению жиров, а также ограничивает контакт продукта с внешней микробиотой [3]. Установлено, что введение в состав пленок функциональных добавок (антиоксидантов, антимикробных агентов, наночастиц) существенно усиливает их защитные свойства, эффективно ингибируя размножение микроорганизмов [3, 4].

При хранении мяса птицы в условиях холодильника использование покрытий на основе хитозана, альгината или казеина позволяет значительно снизить потери влаги и подавить рост микроорганизмов по сравнению с необработанными образцами, одновременно сохраняя привлекательные органолептические свойства [4]. Аналогичный результат зафиксирован и при включении в состав покрытий эфирных масел или природных экстрактов с выраженной антибактериальной активностью [5].

Несмотря на наличие широкой доказательной базы, в современной литературе практически отсутствуют систематизированные данные о применении антимикробных покрытий в условиях близкриоскопических температур. Между тем, сочетание фактора глубокого охлаждения с барьерным действием покрытий может дать значительный синергетический эффект, требующий детального изучения.

Согласно результатам исследований [6-7], синергия низкотемпературного хранения и применения пищевых покрытий позволяет эффективнее ингибировать окисление липидов и обеспечивать микробиологическую стабильность продукции на более длительный срок, чем использование одного лишь холода.

При изучении микрбиоты охлажденной птицы критическое значение имеет не столько общая численность микроорганизмов, сколько качественный состав доминирующих видов. Особую опасность представляют штаммы, способные образовывать биопленки и сохранять активность при низких температурах [7]. В совокупности возникает необходимость комплексного подхода к мониторингу: важно отслеживать динамику развития конкретных таксонов, непо-

средственно ответственных за порчу продукта, а не ограничиваться только общими показателями.

Естественная убыль массы птицы продолжается и на этапе холодильного хранения. В её основе лежат два ключевых фактора: поверхностное испарение влаги и отделение тканевой жидкости. Темпы потери веса напрямую зависят от длительности хранения и стабильности микроклимата в камере [8-10]. Для минимизации усушки оптимальным признан режим с температурой 0-2 °С и относительной влажностью воздуха в пределах 80–85 %. Любое отклонение от данных параметров неизбежно провоцирует ускоренную дегидратацию продукта.

Наличие и тип упаковки во многом определяет интенсивность усушки продукции. При хранении птицы в открытом виде наблюдаются максимальные потери веса из-за беспрепятственного испарения влаги. Применение пленочных материалов, вакуумирования или модифицированной газовой среды (МГС) позволяет не только существенно минимизировать потерю массы, но и стабилизировать качественные характеристики птицы на протяжении всего периода хранения [11-12].

Сегодня в пищевой биотехнологии прослеживается отчетливый тренд на поиск эффективных антибактериальных агентов, способных стать полноценной альтернативой или дополнением к традиционным химическим консервантам и антибиотикам. Особый интерес в данном контексте представляют бактериоцины-пептидные соединения рибосомального синтеза, продуцируемые различными группами бактерий.

Наиболее востребованным и коммерчески успешным представителем этой группы является низин. Данный полициклический пептид, вырабатываемый молочнокислыми бактериями *Lactococcus lactis*, обладает выраженным ингибирующим действием против широкого спектра грамположительных микроорганизмов, включая опасные патогены и спорообразующие бактерии. Благодаря своей доказанной безопасности, низин широко применяется в качестве биоконсерванта во многих странах, включая США и страны Европы [13-18]. Высокий потенциал данного бактериоцина открывает широкие возможности для его интеграции в масштабные производственные линии и дальнейшей диверсификации способов его применения.

Несмотря на большое количество преимуществ низина, его широкое внедрение ограничивается рядом технологических недостатков природных штаммов-продуцентов. Ключевыми проблемами остаются нестабильность получаемого препарата, его высокая чувствительность к изменениям внешней среды (в частности, к колебаниям pH и температуры), а также низкая эффективность при попытках промышленного масштабирования биосинтеза. Поскольку исходные штаммы синтезируют бактериоцины в малых концентрациях, возникает острая необходимость в создании более продуктивных биотехнологических решений. В этом плане определяющую роль играют методы генетической инженерии и точная оптимизация условий культивирования. Использование рекомбинантных штаммов на базе *L. lactis* позволяет преодолеть природные лимитирующие факторы и достичь качественно новых показателей выхода целевого продукта [18].

В процессе биосинтеза новый продуцент F-116 образует бактериоцин, отличным от известного бактериоцина низина. Штамм генотипирован по гену 16S рРНК (*GenBank* EF 100777). На основе штамма F-116 создан препарат LGS, широкого спектра антимикробного действия, эффективный против патогенных и условно-патогенных контаминантов, развивающихся в продуктах питания и сырье при хранении. Активно формируется новое научно-практическое направление – разработка рецептур консервирующих покрытий из нескольких биоконсервантов, обладающих полезными для организма человека свойствами, и сочетание обработки консервантами с низкотемпературным режимом хранения.

Таким образом, проведенный анализ литературы подчёркивает актуальность разработки и внедрения интегрированных решений: пищевых покрытий в сочетании с оптимальными режима-

ми охлаждения, способных существенно повысить сохранность мяса птицы. При этом современная научная база нуждается в расширении сведений о механизмах взаимодействия таких покрытий с микробиологической средой при близкокриоскопическом хранении, что составляет основу настоящего исследования.

Целью работы является определение влияния раствора антимикробного защитного покрытия на основе молочной сыворотки и культуральной жидкости на потери массы тушек птицы и изменение микробиологических показателей тушек птицы в процессе охлаждения и хранения при близкриоскопической температуре в течение 30 суток.

Новизна исследований заключается в определении антимикробных и влагобарьерных свойств, разработанных пищевых пленкообразующих составов на основе природных компонентов и бактериоцина рекомбинантного штамма лактококка.

Материалы и методы. Объектом исследования послужили тушки и полу-тушки цыплят-бройлеров, пищевые покрытия содержащие органические кислоты, а также бактериоцин гибридного штамма *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116.

На первом этапе исследований были проведены модельные эксперименты по обоснованию оптимальной концентрации пищевого пленкообразующего состава. Опыты проводились на серийно выпускаемом пищевом пленкообразующем составе (ППС-10) на основе моноглицеридов (Таблица 1). Водные растворы ППС готовили по рецептуре с массовой долей сухих веществ 0,1; 1; 3; 5 и 10%. Готовые растворы наносили методом распыления на модели-аналоги мяса птицы по теплофизическим свойствам, выполненных из геля агар-агара. Экспериментальные исследования проводили на технологическом стенде лаборатории холодильной технологии ВНИХИ - филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

Таблица 1 - Рецептура пищевого пленкообразующего состава (ППС-10) на основе моноглицеридов

Наименование сырья	Кол-во, %
Пищевой пленкообразующийсостав ППС-10	3,0
Включающий: • Моноглицериды дистиллированные • Эмульгатор вспомогательный по СТП Нижегородского МЖК 020500-59-86 • Калий сорбиновокислый или сорбиновая кислота • Ацетилированные моноглицериды дистиллированные • Глицерин дистиллированный	 0,84* 0,48* 0,06* 1,32* 0,3*
Молочная кислота	2,0
Вода питьевая	95,0

*Примечание: * - массовая доля сухих веществ приведена в пересчете на 3% раствор ППС-10*

На втором этапе были проведены исследования по определению влияния пищевого покрытия на основе молочной сыворотки на потери массы птицы в условиях холодильного хранения и на микробиологические показатели. Для приготовления ППС на основе молочной сыворотки нагревали питьевую воду в котле с подогревом и мешалкой до температуры 55±2 °С и при постоянном перемешивании поочередно вносили молочную сыворотку, глицерин, молочную кислоту, лимонную кислоту и бактериоцин гибридного штамма *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116

в количестве, указанном в таблице 2. Перемешивание продолжали до получения однородной эмульсии. Нанесение покрытия на полу-тушки птицы осуществляли перед охлаждением методом распыления с помощью распылителя Gigant GS-01 (температура раствора при распылении 55±2 °С).

Таблица 2 - Рецептура пищевого пленкообразующего состава на основе молочной сыворотки

Наименование компонента	**Кол-во, %**
Молочная сыворотка	5,0
Молочная кислота	2,0
Лимонная кислота	0,5
Глицерин	10,0
Культуральная жидкость *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116	23,0*
Вода	80,2

**Содержание сухих веществ в культуральной жидкости 10,0 %.*

Контрольные образцы полу-тушек птицы исследовали после охлаждения и через 5, 10, 15 суток хранения в упакованном виде, а опытные образцы исследовали после охлаждения, упаковки и через 5, 10, 15, 20, 25, 30 суток хранения. Образцы хранили при температуре 0±1 °С, относительной влажности 8590%, до появления явных признаков порчи по внешнему виду образцов, органолептическим и санитарно-гигиеническим показателям. Потери массы определяли взвешиванием образцов на весах CAS SW-5.

Отбор проб и подготовку к микробиологическим исследованиям проводили согласно ГОСТ 31467-2012 (не менее 3-х проб). Общее микробное число (ОМЧ) определяли по ГОСТ Р 7702.2.1-2017 (Продукты убоя птицы, продукция из мяса птицы и объекты окружающей производственной среды).

На третьем этапе наших исследований были проведены эксперименты по определению влияния антимикробной активности коммерческого препарата «Nisin Pro» в сочетании с культуральной жидкостью штамма *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116 на общее микробное число образцов мяса птицы в условиях холодильного хранения. В качестве основного экспериментального образца был приготовлен раствор ППС, состоящий из: 0,1%, культуральной жидкости (КЖ) штамма F-116, 0,1% раствора низина, 1% желатина и 2% молочной кислоты.

Все опыты имели не менее 3-х повторностей, обеспечивающих получение воспроизводимых и достоверных данных. Результаты, полученные в ходе эксперимента, с оформлением таблиц, обрабатывали с помощью компьютерных программ Excel (Microsoft Inc.) и Statistica for Windows (v.5.0 StatSoftInc), рассчитывая среднее арифметическое, доверительные интервалы, стандартное отклонение. Достоверность различий между средними величинами оценивали с использованием t-критерия Стьюдента ($p \leq 0,05$).

Результаты и обсуждение. Экспериментальные данные по влиянию различных концентраций ППС-10 на уменьшение усушки и изменение коэффициента сопротивления испарению влаги при охлаждении и последующем хранении проводили в модельных опытах в течение 5 суток (рис.1). Из данных рисунка следует, что величина усушки опытных образцов уменьшается.

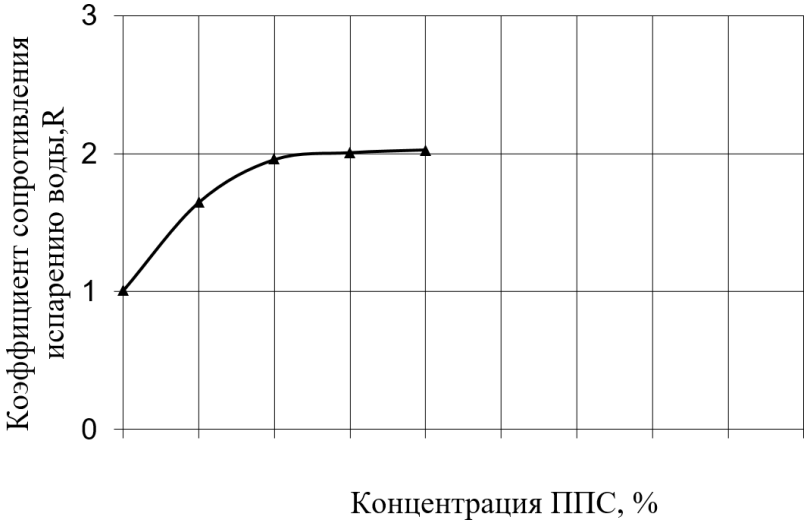


Рис.1 - Изменение коэффициента сопротивления испарению воды с поверхности моделей в зависимости от концентрации раствора ППС для продолжительности их хранения 120 часов

С ростом концентрации от 0 до 10%, а величина сопротивления испарению (R) влаги увеличивается с ростом концентрации раствора пищевого покрытия и достигает значения R≈2 при концентрации ППС в растворе 3-5%. Разница между значениями потерь массы опытных образцов для концентрации 3 и 5% недостоверна при p≤0,05. Это дает возможность сделать вывод о том, что для ППС-10 на основе моноглицеридов с концентрацией выше 3% применять экономически нецелесообразно.

В предыдущих исследованиях [19] ППС-10 в сочетании с молочной кислотой показал весьма высокий уровень антимикробной защиты, однако недостатком данного состава является сложность его получения, в связи с чем был создан новый пищевой пленкообразующий состав на основе природных органических компонентов.

Экспериментальный пищевой пленкообразующий состав (ППС) приготовлен на основе сухой молочной сыворотки (ГОСТ 33958-2016), которая содержит биологически активные вещества, включая белки, углеводы, незаменимые аминокислоты, витамины А, С, Е, Н и группы В, биотин, холин, микроэлементы-калий, кальций, фосфор, магний, йод и цинк и молочнокислые бактерии (до ≤1×10² КОЕ/г). Лимонная кислота играет роль антиокислителя, предотвращая окисление подкожных жиров, содержащихся в тушках птицы. Глицерин служит в пищевом пленкообразующем составе пластификатором.

В качестве природного нетоксичного антимикробного агента использовали препарат LGS, активным веществом которого служит бактериоцин по типу низина, синтезируемый рекомбинантным штаммом *L. lactis* ssp. *lactis* F-116 (GenBank: EF100777.1) при культивировании в ферментационной среде, следующего состава (г/л): сахароза - 20,0; KH_2PO_4- 20,0; NaCl - 2,0; $MgSO_4$- 0,2; дрожжевой экстракт - 20,0; pH 6,8 - 7,0. Лиофильно высушенный препарат обладает активностью 1100 МЕ/мг в пересчете на активность эталонного препарата “Nisaplin” фирмы“ Aplin & Barrett, LTD.

Пик бактериоцинсинтезирующей активности штамма F-116 приходится на 12-й час культивирования. Важно учитывать особенности локализации целевого продукта: в то время как часть бактериоцина экстрагируется в среду непосредственно в процессе ферментации, до 50% его объема остается прочно связанным с мембранами и клеточными стенками продуцента.

Результаты экспериментальных исследований по определению влияния обработки поверхности тушек птицы антимикробным защитным покрытием на основе молочной сыворотки и культуральной жидкости штамма F-116 на товарный вид и потери массы в процессе охлаждения и хранения при близкриоскопической температуре представлены на рисунках 2 и 3.



а) **б)**

Рис.2 - Товарный вид охлажденного мяса птицы после обработки: а - до упаковки; б - после упаковки.

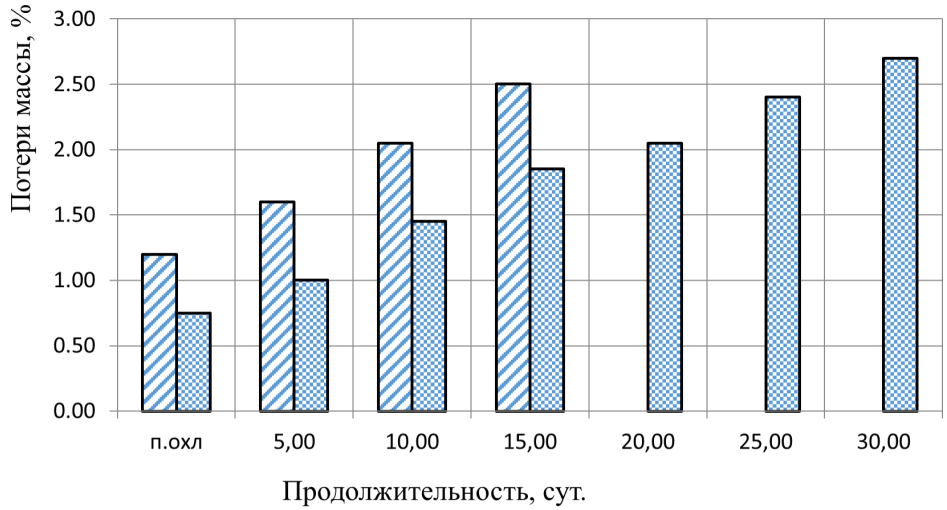


Рис.3 - Влияние охлаждения и хранения на потери массы контрольных (1) и опытных (2) полу-тушек цыплят бройлеров

Графические данные (рис.3) отчетливо демонстрируют существенный разрыв в динамике потери массы между контрольными и опытными образцами уже на этапе охлаждения, что обусловлено массой нанесенного покрытия и его защитными свойствами, препятствующими испарению влаги с поверхности птицы.

Важно отметить: преимущество опытных образцов со временем только усиливается. Если сразу после охлаждения разница в усушке составляла 0,45%, то к 10-м суткам она достигла 0,60%, увеличившись в 1,3 раза, в чем и заключается принципиальное отличие предлагаемой технологии от традиционных методов интенсивного охлаждения (воздушного или гидроаэрозольного). При использовании стандартных способов разница в массе между контролем и опытом в процессе хранения обычно сглаживается, тогда как применение ППС позволяет стабильно удерживать влагу. В конечном итоге, показатели массы опытных полутушек после 15 суток хранения оказались даже на 0,20% выше, чем у контрольных образцов, хранившихся всего 10 суток.

Полученные данные подтверждают, что основной разрыв в показателях убыли массы меж-

ду контрольными и опытными образцами формируется уже на этапе охлаждения, что может быть обусловлено двумя факторами: во-первых, изменением исходного веса птицы за счет нанесения покрытия, и во-вторых — созданием физического барьера, который значительно повышает коэффициент сопротивления испарению влаги. Важно подчеркнуть, что при использовании ППС разница в усушке между контролем и опытом со временем только нарастает. Если сразу после охлаждения этот показатель составляет 0,45%, то к 15-м суткам он достигает 0,65%, увеличиваясь в 1,4 раза. В этом заключается принципиальное отличие предлагаемого метода от интенсивных способов охлаждения (при низких температурах и высокой скорости воздуха) или гидроаэрозольной обработки: в тех случаях разница в массе между образцами в процессе последующего хранения, напротив, имеет тенденцию к сокращению.

В наших экспериментах общее микробное число (ОМЧ) в мышечной ткани полу-тущек цыплят контрольных образцов (образцы обработаны водой) составило $2,6\pm0,08\times10^3$ КОЕ/г, а обработанных ППС + бактериоцин $3,2\pm0,01\times10^3$, продукт по показателям качества соответствовал требования СанПиН 2.3.2.1078-01 (Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (Табл.3).

Таблица 3 - Изменение общего микробного числа (ОМЧ) после обработки тушек птицы консервирующими агентами и хранения в условиях холодильной камеры при 0±1

№	Состав консервирующей композиции	Общее микробное число после обработки и хранения, КОЕ/г			
		исходное	10 суток	15 суток	20 суток
1	ППС+0,1% бактериоцин ЛГС + 2% молочной кислоты	$3,2\pm0,01\times10^3$	$4,7\pm0,02\times10^3$	$2,4\pm0,09\times10^4$	$8,7\pm0,05\times10^4$
2	Контроль (вода питьевая)	$2,6\pm0,08\times10^3$	$7,5\pm0,04\times10^5$	Сняты с хранения	-

Примечание: ППС - пищевой пленкообразующий состав на основе молочной сыворотки

Следует отметить, что микробная обсемененность образцов, обработанных ППС на основе молочной сыворотки и с препаратом LGS, на первом этапе хранения одинаков и представлен, в основном, мелкими колониями, характерными для молочнокислых бактерий. Эффект обусловлен наличием в препарате LGS лактококков — активных продуцентов бактериоцинов. Данные микроорганизмы способны восстанавливаться после стадии анабиоза, в которую они переходят при лиофильной сушке. Однако при длительном воздействии низких температур популяция мезофильных лактококков постепенно сокращается, а их место занимают психротрофные микроорганизмы, обладающие природной устойчивостью к действию низина.

В процессе холодильного хранения состав микробиоты, колонизирующей поверхность тушек, закономерно трансформируется. На фоне отмирания вегетативных мезофильных форм (включая и сами лактококки) наблюдается ускоренное развитие психротрофной флоры. Тем не менее использование защитного состава позволило существенно замедлить темпы микробной обсемененности. Согласно данным таблицы 2, через 10 суток хранения показатель ОМЧ в опытных образцах увеличился всего в 1,5 раза, в то время как в контрольной группе рост был практически трехсоткратным.

В контрольном образце после 10 суток хранения в условиях охлаждения ОМЧ за 10 суток хранения составило $7,5\pm0,04\times10^5$. Эти образцы мя-

са птицы (обработанные водой) на 10 сутки имели органолептические показатели, присущие испорченному мясу птицы (ослизнение поверхности, неприятный запах**).** В образцах мяса были обнаружены бактерии из рода *Pseudomonas*, энтерококки, анаэробные гнилостные бактерии *Proteus s*pp., вызывающие неприятный запах, ослизнение поверхности образцов, были обнаружены дрожжи и плесени, показатели качества мяса птицы превосходили допустимый уровень микробиальной и органолептической безопасности по СанПиН 2.3.2.1078-01. Образцы сняты с хранения.

В опытных образцах мяса птицы, обработанных пищевым пленкообразующим составом, общее микробное число на 10 сутки хранения составило $4,7\pm0,02\times10^3$ КОЕ/г, на 15 сутки $2,4\pm0,09\times10^4$ КОЕ/г, а на 20 сутки $8,7\pm0,05\times10^4$ КОЕ/г, что не превышало предельно допустимое значение микробиологической обсемененности в соответствии с требованием СанПиН 2.3.2.1078-01.

Результаты исследований по изучению влияния обработки тушек птицы антимикробным защитным покрытием на основе 1% желатина, 0,1% препарата “Nisin Pro” и культуральной жидкости рекомбинантного штамма F-116 в процессе хранения при близкриоскопической температуре на общее микробное число (ОМЧ) показали, что по мере хранения в контрольном образце, обработанном питьевой водой, без добавления консервирующих агентов, наблюдали постепенное увеличение обсемененности: исходное количество микробов в этом образце от $2,6\times10^3$ КОЕ/г за 5 дней увеличилось на порядок, а за 10 суток до $3,9\times10^5$ КОЕ/г, что превышает допустимый уровень обсемененности охлажденной птицы, а за последующие 15 дней хранения при 0±1 °С ОМЧ достигло $1,2\times10^8$ КОЕ/г. Отмечено ослизнение поверхности образцов мяса, цвет сероватый, затхлость и неприятный запах, были обнаружены бактерии бактерии *Proteus vulgaris*, плесени и дрожжи, являющиеся преобладающими контаминантами, ответственных за порчу мяса птицы, которые преимущественно находятся на его поверхности, а, размножаясь в сырье, вызывают биохимические реакции, которые приводят к таким изменениям, как протеолиз, деградация аминокислот и самое главное, окисление липидов, которые на поздних стадиях хранения мяса птицы вызывают появление посторонних привкусов и слизи, что приводят к снижению качества и сокращению коммерческого срока годности продукта.

В образцах, обработанных 0,1% раствором «Nisin Pro», уже на 10-е сутки хранения показатель ОМЧ превысил предельно допустимые значения (Табл. 4).

Таблица 4 - Изменение общего микробного числа (ОМЧ) после обработки тушек цыплят препаратом “Nisin Pro” в сочетании с желатином, молочной кислотой и культуральной жидкостью штамма Lactococcus lactis ssp. lactis F-116 в процессе хранения при близкриоскопической температуре в течение 30 суток

№	Добавки к составу ППС	Общее микробное число после обработки и хранения (КОЕ/г)						
		Начальное (после обработки)	5 сут.	10 сут.	15сут.	20 сут.	25 сут.	30 сут.
1	0,1% “Nisin Pro”	$2,3\pm0,01\times10^3$	$7,2\pm0,03\times10^3$	$2,7\pm0,01\times10^4$	$6,5\pm0,03\times10^5$	$2,1\pm0,03\times10^6$	$4,8\pm0,04\times10^6$	$7,1\pm0,03\times10^7$
2	0,1%“Nisin Pro” + 1-% желатина	$3,1\pm0,02\times10^3$	$5,4\pm0,03\times10^3$	$7,3\pm0,03\times10^4$	$5,3\pm0,03\times10^5$	$1,2\pm0,03\times10^6$	$4,8\pm0,04\times10^6$	$4,1\pm0,02\times10^7$
3	“Nisin Pro” + 2% МК	$2,5\pm0,01\times10^3$	$4,6\pm0,02\times10^3$	$2,8\pm0,02\times10^4$	$8,6\pm0,05\times10^4$	$1,4\pm0,03\times10^4$	$1,4\pm0,02\times10^6$	$3,7\pm0,01\times10^7$
4	0,1%“NisinPro” +1% желатина + 2% МК	$3,0\pm0,02\times10^3$	$4,2\pm0,02\times10^3$	$5,1\pm0,02\times10^3$	$2,7\pm0,02\times10^4$	$4,1\pm0,02\times10^5$	$1,6\pm0,01\times10^6$	$8,6\pm0,04\times10^6$

5	0,1% “Nisin Pro” +1% желатина + 2% МК + 0,1% КЖ *L.lactis*	$5,4±0,02×10^3$	$9,1±0,09×10^3$	$1,4±0,003×10^4$	$5,1±0,03×10^4$	$9,4±0,04×10^4$	$1,1±0,02×10^5$	$1,1±0,02×10^6$
6	Контроль (вода питьевая)	$2,6±0,01×10^3$	$2,7±0,01×10^4$	$3,9±0,02×10^5$	$7,0±0,03×10^6$	$8,6±0,04×10^6$	$5,7±0,03×10^7$	$1,2±0,05×10^8$

При анализе комбинированного воздействия (0,1% низина и 1% желатина) было отмечено, что на начальном этапе уровень обсемененности тушек оказался несколько выше по сравнению с контролем, обработанным питьевой водой. Вероятно, это связано с исходным микробиологическим фоном самого желатина. Тем не менее в процессе дальнейшего хранения динамика роста микроорганизмов заметно замедлилась. Наблюдаемое снижение численности мезофильных бактерий подтверждает эффективность желатина в качестве защитного барьера, препятствующего повторной контаминации поверхности продукта.

Общая обсемененность образцов, обработанных 0,1%-ным раствором препарата “Nisin Pro” с добавлением 2% молочной кислоты, увеличивает срок хранения образцов до 15 суток при сохранении органолептических показателей. Сочетание действия низина, желатина, молочной кислоты и культуральной жидкости *L. lactis ssp. lactis* F-116 - продуцента бактериоцина широкого спектра действия позволило увеличить срок хранения до 20 суток в процессе хранения при близкриоскопической температуре, дрожжевые клетки не были обнаружены, и по внешнему виду и органолептическим показателям мясо соответствовало ГОСТ 10444.13. Исследования показали, что ни в одном из образцов патогенные микроорганизмы рода *Salmonella*, а также *Listeria monocytogenes* не были обнаружены.

Выводы. Установлена зависимость между концентрацией пленкообразующего состава на основе моноглицеридов (ППС-10) и коэффициентом сопротивления испарению влаги. На основе полученных данных обоснована оптимальная концентрация компонентов, обеспечивающая максимальную защиту поверхности птицы в процессе охлаждения и последующего хранения.

Установлено, что применение ППС на базе молочной сыворотки и культуральной жидкости позволяет существенно минимизировать усушку. Если сразу после охлаждения разница в потерях массы между опытом и контролем составляла 0,45%, то к 15-м суткам хранения разрыв увеличился в 1,4 раза (до 0,65%), что доказывает преимущество ППС перед интенсивными методами охлаждения (воздушным или гидроаэрозольным), при которых разница в массе между образцами в процессе хранения обычно нивелируется.

Экспериментально подтверждено, что использование защитных покрытий обеспечивает удержание влаги в тканях. Потери массы опытных образцов через 15 суток хранения в упаковке оказались на 0,20% ниже, чем у контрольных тушек на 10-е сутки. В то же время традиционные способы высокоскоростного охлаждения не обеспечивают столь длительного барьерного эффекта.

Доказано, что обработка птицы многокомпонентным составом (молочная сыворотка, глицерин, органические кислоты и бактериоцин штамма *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* F-116) эффективно подавляет развитие контаминантной микробиоты. Внедрение данной технологии позволяет увеличить срок хранения продукции при температуре 0±1 °С до 20 суток.

Использование натуральных биоконсервантов не только гарантирует микробиологическую безопасность, но и повышает биологическую ценность продукта. Обогащение мяса аминокислотами, витаминами и антиоксидантами, входящими в состав сыворотки и бактериоцинов, открывает перспективы для производства функциональных продуктов питания, способствующих укреплению здоровья потребителей.

Установлено, что сформированный на поверхности барьер препятствует проникновению па-

тогенов в глубокие слои мышечной ткани и ингибирует их размножение. Это позволяет снизить общую обсемененность (ОМЧ) на три порядка, обеспечивая полное соответствие продукции требованиям СанПиН 2.3.2.1078-01 в течение всего периода хранения.

Сравнительный анализ показал, что комбинация низина с желатином и 2% молочной кислотой обладает умеренным защитным действием, но недостаточно эффективно сдерживает рост дрожжей и гнилостных бактерий при низкотемпературных режимах. Полученные результаты указывают на выраженный синергетический потенциал при совместном использовании низина с другими антимикробными агентами и бактериоцинами различного спектра действия.

Результаты апробации в условиях реального производства подтвердили высокую эффективность разработанной технологии. Её внедрение позволяет одновременно решить три задачи: повысить санитарно-гигиеническую безопасность продукции, увеличить сроки её реализации и существенно сократить экономические потери, связанные с естественной убылью массы.

Литература

1. Fabra M. J., Talens P., Chiralt A. Influence of calcium on tensile, optical and water vapour permeability properties of sodium caseinate edible films //Journal of Food Engineering. - 2010.-Vol.96(3). - P. 356-364. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2009.08.010.

2. Kumar L. et al. Edible films and coatings for food packaging applications: A review //Environmental Chemistry Letters. -2021.-Vol.20(4). -P.875-900. DOI 10.1007/s10311-021-01339-z.

3. Ramos O. L. et al. Edible films and coatings from whey proteins: a review on formulation, and on mechanical and bioactive properties //Critical reviews in food science and nutrition. - 2012.-Vol.52(6). -P.533-552. DOI 10.1080/10408398.2010.500528.

4. Elsabee M. Z., Abdou E. S. Chitosan based edible films and coatings: A review //Materials science and engineering: C.-2013. Vol.33(4). -P.1819-1841.DOI 10.1016/j.msec.2013.01.010.

5. Sánchez-Ortega I., Blanca E. Garcia-Almendarez, et al. Characterization and antimicrobial effect of starch-based edible coating suspensions//Food Hydrocolloids. -2016.- Vol.52.-P.906-913. DOI 10.1016/j.foodhyd.2015.09.004.

6. Li X. Zhand R, et al. Active packaging for the extended shelf-life of meat: perspectives from consumption habits, market requirements and packaging practices in China and New Zealand //Foods. -2022.-Vol.11(18): 2903. DOI 10.3390/foods11182903.

7. Yi J, Chen F, Xu C.et al. Decoding spoilage metabolism in chicken breast: A functional microbial perspective on off-flavor formation//International Journal of Food Microbiology. - 2025. -Vol.442:111367. DOI 10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111367.

8. Huezo R. Smith D.P.et al. Effect of immersion or dry air chilling on broiler carcass moisture retention and breast fillet functionality //Journal of applied poultry research. - 2007.-Vol.16(3). -P.438-447. DOI 10.1093/japr/16.3.438.

9. James C., Vincent C. et al. The primary chilling of poultry carcasses-a review Refrigeration des carasses de poulet: tendances//International Journal of Refrigeration. - 2006. -Vol.29(6). -P.847-862. DOI 10.1016/j.ijrefrig.2005.08.003.

10. Jeong J. Y. Janardhan K.K. et al. Moisture content, processing yield, and surface color of broiler carcasses chilled by water, air, or evaporative air//Poultry science. -2011.-Vol.90(3). -P.687-693. DOI 10.3382/ps.2010-00980.

11. Рогов И.А. Технология мяса и мясных продуктов. //КолосС. -2009. –С.711. ISBN 978-5-9532-0644-0.

12. В. М. Позняковский, О. А. Гончаренко, Д. В. Криштафович. Товароведение и экспертиза мясных и мясосодержащих продуктов. //Издательство ”Лань». - 2020. -№ 4. -С.432.ISBN 978-5-8114-4942-2.

13. Han J. H. Chapter 9-Edible films and coatings: a review //Innovations in food packaging (Second Edition). -2014. -P.213-255. DOI 10.1016/B978-0-12-394601-0.00009-6.

14. Erdem Büyükkiraz M., Kesmen Z. Antimicrobial peptides (AMPs): A promising class of antimicrobial compounds//Journal of applied microbiology. -2022. -Vol.132(3). -P.1573-1596. DOI 10.1111/jam.15314.

15. Sánchez-Ortega I. Et al. Antimicrobial edible films and coatings for meat and meat products preservation//The scientific world journal. -2014. -Vol.2014(1)/248935. DOI 10.1155/2014/248935.

16. Khare A. K., Babu R.N, et al. Utilization of carrageenan, citric acid and cinnamon oil as an edible coating of chicken fillets to prolong its shelf life under refrigeration conditions //Veterinary World. -2016. -Vol.9(2):166-75. DOI 10.14202/vetworld.2016.166-175.

17. Moura-Alves M. Et al. Antimicrobial and antioxidant edible films and coatings in the shelf-life improvement of chicken meat//Foods. -2023.-Vol.12(12):2308. DOI 10.3390/foods12122308.

18. Stoyanova L. G., Napalkova M. V., Netrusov A. I. The creating a new biopreservative based on fusant strain Lactococcus lactis SSP. lactis F-116 for food quality and its safety //Hygienic Engineering and Design. -2016.-Vol.16.-P.19-27. -URL: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20173079592.- Date obrashcheniya: 07.03.2026.

19. Umiraliyeva L., Stoyanova L. Dibirasulaev M, et al. Study of the effect of food coatings based on monoglycerides with the inclusion of biopreservatives in their composition on the microbiological safety during storage of chilled poultry meat //CyTA-Journal of Food. -2025.-Vol.23(1):2561649. DOI 10.1080/19476337.2025.2561649.

References

1. Fabra M. J., Talens P., Chiralt A. Influence of calcium on tensile, optical and water vapour permeability properties of sodium caseinate edible films //Journal of Food Engineering. - 2010.-Vol.96(3). - P. 356-364. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2009.08.010.

2. Kumar L. et al. Edible films and coatings for food packaging applications: A review //Environmental Chemistry Letters. -2021.-Vol.20(4). -P.875-900. DOI 10.1007/s10311-021-01339-z.

3. Ramos O. L. et al. Edible films and coatings from whey proteins: a review on formulation, and on mechanical and bioactive properties //Critical reviews in food science and nutrition. - 2012.-Vol.52(6). -P.533-552. DOI 10.1080/10408398.2010.500528.

4. Elsabee M. Z., Abdou E. S. Chitosan based edible films and coatings: A review //Materials science and engineering: C.-2013. Vol.33(4). -P.1819-1841.DOI 10.1016/j.msec.2013.01.010.

5. Sánchez-Ortega I., Blanca E. Garcia-Almendarez, et al. Characterization and antimicrobial effect of starch-based edible coating suspensions//Food Hydrocolloids. -2016.- Vol.52.-P.906-913. DOI 10.1016/j.foodhyd.2015.09.004.

6. Li X. Zhand R, et al. Active packaging for the extended shelf-life of meat: perspectives from consumption habits, market requirements and packaging practices in China and New Zealand //Foods. -2022.-Vol.11(18): 2903. DOI 10.3390/foods11182903.

7. Yi J, Chen F, Xu C.et al. Decoding spoilage metabolism in chicken breast: A functional microbial perspective on off-flavor formation//International Journal of Food Microbiology. - 2025. -Vol.442:111367. DOI 10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111367.

8. Huezo R. Smith D.P.et al. Effect of immersion or dry air chilling on broiler carcass moisture retention and breast fillet functionality //Journal of applied poultry research. - 2007.-Vol.16(3). -P.438-447. DOI 10.1093/japr/16.3.438.

9. James C., Vincent C. et al. The primary chilling of poultry carcasses-a review Refrigeration des carasses de poulet: tendances//International Journal of Refrigeration. - 2006. -Vol.29(6). -P.847-862. DOI 10.1016/j.ijrefrig.2005.08.003.

10. Jeong J. Y. Janardhan K.K. et al. Moisture content, processing yield, and surface color of broiler carcasses chilled by water, air, or evaporative air//Poultry science. -2011.-Vol.90(3). -P.687-693. DOI 10.3382/ps.2010-00980.

11. Rogov I.A. Tehnologija mjasa i mjasnyh produktov. //KolosS. -2009. –S.711. ISBN 978-5-9532-0644-0. [in Russian]

12. V. M. Poznjakovskij, O. A. Goncharenko, D. V. Krishtafovich. Tovarovedenie i jekspertiza mjasnyh i mjasosoderzhashhih produktov. //Izdatel’ stvo ”Lan’». - 2020. -№ 4. -S.432.ISBN 978-5-8114-4942-2. [in Russian]

13. Han J. H. Chapter 9-Edible films and coatings: a review //Innovations in food packaging (Second Edition). -2014. -P.213-255. DOI 10.1016/B978-0-12-394601-0.00009-6.

14. Erdem Büyükkiraz M., Kesmen Z. Antimicrobial peptides (AMPs): A promising class of antimicrobial compounds//Journal of applied microbiology. -2022. -Vol.132(3). -P.1573-1596. DOI 10.1111/jam.15314.

15. Sánchez-Ortega I. Et al. Antimicrobial edible films and coatings for meat and meat products preservation//The scientific world journal. -2014. -Vol.2014(1)/248935. DOI 10.1155/2014/248935.

16. Khare A. K., Babu R.N, et al. Utilization of carrageenan, citric acid and cinnamon oil as an edible coating of chicken fillets to prolong its shelf life under refrigeration conditions //Veterinary World. -2016. -Vol.9(2):166-75. DOI 10.14202/vetworld.2016.166-175.

17. Moura-Alves M. Et al. Antimicrobial and antioxidant edible films and coatings in the shelf-life improvement of chicken meat//Foods. -2023.-Vol.12(12):2308. DOI 10.3390/foods12122308.

18. Stoyanova L. G., Napalkova M. V., Netrusov A. I. The creating a new biopreservative based on fusant strain Lactococcus lactis SSP. lactis F-116 for food quality and its safety //Hygienic Engineering and Design. -2016.-Vol.16.-P.19-27. -URL: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20173079592 .- Date obrashcheniya: 07.03.2026.

19. Umiraliyeva L., Stoyanova L. Dibirasulaev M, et al. Study of the effect of food coatings based on monoglycerides with the inclusion of biopreservatives in their composition on the microbiological safety during storage of chilled poultry meat //CyTA-Journal of Food. -2025.-Vol.23(1):2561649. DOI 10.1080/19476337.2025.2561649.

Сведения об авторах

Умиралиева Л.Б. - кандидат технических наук, ассоциированный профессор, ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», Алматы, Казахстан, e-mail: l.umiraliyeva@rpf.kz;

Дибирасулаев М.А.- доктор технических наук, ВНИХИ - филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, Москва, Россия, e-mail: dmama42@mail.ru;

Дибирасулаев Д.М.- кандидат технических наук, ВНИХИ - филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, Москва, Россия, e-mail: dibdm@mail.ru;

Стоянова Л.Г.- -доктор биологических наук, профессор, МГУ им. М. В. Ломоносова г. Москва, Россия, e-mail: stoyanovamsu@mail.ru;

Турлыбаева С.С.-кандидат сельскохозяйственных наук, ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности», Алматы, Казахстан, e-mail: s.turlybaeva@rpf.kz;

Филатов И.Д PhD-докторант, ТОО «Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности» Алматы, Казахстан, e-mail: filatov-vanya@inbox.ru.

Information about the authors

Umiraliyeva L.B. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, “Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry” LLP, Almaty, Kazakhstan, e-mail: l.umiraliyeva@rpf.kz,

Dibirasulaev M.A. - Doctor of Technical Sciences, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry - branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Science, Moscow, Russia, e-mail: dmama42@mail.ru;

DibirasulaevD.M. - Candidate of Technical Sciences, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry - branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Science, Moscow, Russia, e-mail: dibdm@mail.ru;

Stoyanova L. G. - Doctor of Biological Sciences, Professor, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, e-mail: stoyanovamsu@mail.ru;

Turlybaeva S.S. - Candidate of agricultural sciences, ‘Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry’ LLP, Almaty, Kazakhstan, e-mail: s.turlybaeva@rpf.kz;

Filatov I.D. - PhD student, “Kazakh Scientific Research Institute of Processing and Food Industry” Almaty, Kazakhstan, LLP e-mail: filatov-vanya@inbox.ru

МРНТИ 52.01.81, 50.47.31 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1404**

СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ НЕДРОБИМЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЯХ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ

[1]К. Акишев✉, [2]А. Подвалов, [1]А. Зейнуллин✉, [1]Е. Айбульдинов✉, [2]А. Нурмаганбетов, [1]М. Оспанова, [2]М. Чагай, [2]М. Айтиева, [3]С. Хусаинова, [1]Л. Мылтыкбаева

[1]Казахский университет технологии и бизнеса им.К.Кулажанова, Астана, Казахстан,
[2]ТОО AG Tech, Астана, Казахстан,
[3]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

✉ *Корреспонденты-авторы: akmail04cx@mail.ru, karim_57@mail.ru*

Актуальность исследования связана прежде всего с высокой аварийностью и значительными эксплуатационными потерями конвейерных линий рудоподготовки горно-обогатительных комбинатов, из-за попадания недробимых включений в технологическое оборудование. Целью работы является разработка и внедрение интеллектуальной системы обнаружения и автоматического удаления недробимых включений для повышения надёжности и эффективности работы дробильно-транспортного комплекса (ДТК).

В работе использованы методы анализа эксплуатационных данных, алгоритмы машинного зрения, интеллектуальной обработки сигналов, методы системного и технико-экономического анализа.

Разработан алгоритм детекции, классификации недробимых включений в режиме реального времени, реализующий замкнутый контур «обнаружение - прогноз - управление», обоснована интеграция с исполнительными механизмами удаления включений.

Научная новизна исследования заключается в разработке превентивного автоматического управления процессом удаления объектов не рудного характера без остановки конвейерной линии, количественной оценки эффекта внедрения на основе отчёта месторождения Нурказган. Установлена возможность сокращения внеплановых простоев с 420 до 180 ч/год, аварийных остановок - с 38 до 15 раз/год, повреждений дробилок - с 12 до 4 случаев/год, эксплуатационных потерь - со 100 % до 65 %.

Практическая значимость работы заключается в возможности масштабирования разработанной системы на ГОКах Республики Казахстан без изменения базовой технологической схемы.

Дальнейшие исследования направлены на адаптивное обучение алгоритмов, расширению системы на немагнитные включения.

Ключевые слова: конвейерные линии, недробимые включения, рудоподготовка, интеллектуальная система, автоматическое удаление, машинное зрение.

ТАУ-КЕН БАЙЫТУ КОМБИНАТТАРЫНЫҢ КОНВЕЙЕРЛІК ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ ҰСАҚТАЛМАЙТЫН ҚОСЫНДЫЛАРДЫ АНЫҚТАУ ЖӘНЕ ЖОЮ ЖҮЙЕСІ

[1]К. Акишев✉, [2]А. Подвалов, [1]А. Зейнуллин✉, [1]Е. Айбульдинов✉, [2]А. Нұрмағанбетов, [1]М. Оспанова, [2]М. Чагай, [2]М. Айтиева, [3]С. Хусаинова, [1]Л. Мылтықбаева

[1]«Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана, Қазақстан,
[2]ЖКС AG Tech, Астана, Қазақстан,
[3]Еуразия ұлттық университеті Л. Н. Гумилева Астана, Қазақстан,
e-mail: akmail04cx@mail.ru, karim_57@mail.ru

Зерттеудің өзектілігі, ең алдымен, Технологиялық жабдыққа мызғымас қосылыстардың түсуіне байланысты тау-кен байыту комбинаттарының конвейерлік желілерінің жоғары авариялылығымен және айтарлықтай пайдалану шығындарымен байланысты. Жұмыстың мақсаты-ұсақтау-көлік кешенінің (ДТК) сенімділігі мен тиімділігін арттыру үшін ұсақталмайтын қосындыларды анықтаудың және автоматты түрде жоюдың интеллектуалды жүйесін әзірлеу және енгізу.

Жұмыста операциялық деректерді талдау әдістері, машиналық көру алгоритмдері, сигналдарды интеллектуалды өңдеу, жүйелік және техникалық-экономикалық талдау әдістері қолданылады.

”Анықтау - болжау - басқару” тұйық контурын іске асыратын нақты уақыт режимінде детекциялау, сынбайтын қосындыларды жіктеу алгоритмі әзірленді, қосындыларды жоюдың атқарушы тетіктерімен интеграциялау негізделген.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы конвейерлік желіні тоқтатпай, кенді емес сипаттағы объектілерді жою процесін алдын ала автоматты басқаруды, Нұрқазған кен орнының есебі негізінде енгізу әсерін сандық бағалауды әзірлеу болып табылады. Жоспардан тыс тоқтап қалуды жылына 420 - дан 180 сағатқа дейін, авариялық тоқтап қалуды - жылына 38 - ден 15 есеге дейін, ұсатқыштардың зақымдануын-жылына 12-ден 4 жағдайға дейін, пайдалану шығындарын-100% - дан 65% - ға дейін қысқарту мүмкіндігі белгіленген.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы базалық технологиялық схеманы өзгертпестен Қазақстан Республикасының ТБК-де әзірленген жүйені масштабтау мүмкіндігінде жатыр.

Әрі қарайғы зерттеулер алгоритмдерді адаптивті оқытуға, жүйені магниттік емес қосындыларға кеңейтуге бағытталған.

Түйін сөздер: конвейер желілері, сынбайтын қосындылар, Кен дайындау, интеллектуалды жүйе, автоматты жою, машиналық көру.

A SYSTEM FOR DETECTING AND REMOVING NON-CRUSHING INCLUSIONS ON CONVEYOR LINES OF MINING AND PROCESSING PLANTS

[1]K. Akishev✉, [2]A. Podvalov, [1]A. Zeynullin✉, [1]Y. Aibuldinov✉, [2]A. Nurmaganbetov, [1]M. Ospanova, [2]M. Chagay, [2]M. Aitiyeva, [3]S. Khusainova, [1]L. Myltykbayeva

[1]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,
[2]AG Tech LLP, Astana, Kazakhstan,
[3]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
e-mail: akmail04cx@mail.ru, karim_57@mail.ru

The relevance of the study is primarily related to the high accident rate and significant operational losses of conveyor lines for ore preparation of mining and processing plants, due to the ingress of non-crushing inclusions into technological equipment. The aim of the work is to develop and implement an intelligent system for detecting and automatically removing non-crushing inclusions to improve the reliability and efficiency of the crushing and transport complex (DTC).

The paper uses methods of operational data analysis, machine vision algorithms, intelligent signal processing, methods of system and technical and economic analysis.

An algorithm for detecting and classifying non-destructive inclusions in real time has been developed, implementing a closed loop ”detection - prediction - control”, and integration with actuators for removing inclusions has been substantiated.

The scientific novelty of the research lies in the development of preventive automatic control of the process of removing non-ore objects without stopping the conveyor line, quantifying the effect of implementation based on the Nurkazgan deposit report. It is possible to reduce unplanned downtime from 420 to 180 hours/year, emergency shutdowns from 38 to 15 times/year, damage to crushers from 12 to 4 cases/year, and operational losses from 100% to 65%.

The practical significance of the work lies in the possibility of scaling the developed system at the mining and processing plants of the Republic of Kazakhstan without changing the basic technological scheme.

Further research is aimed at adaptive learning of algorithms that extend the system to non-magnetic inclusions.

Keywords: conveyor lines, non-crushing inclusions, ore preparation, intelligent system, automatic removal, machine vision

Введение. На горнообогатительных комбинатах (ГОК) проблема недробимых (в первую очередь ферромагнитных) включений на конвейерных линиях приводит к регулярным аварийным остановкам и потерям времени в частности на Нурказганской обогатительной фабрике за 6 месяцев суммарный простой составил 3269 минут (54 ч 29 мин) при 505 остановках, причины - «куски металла, болты, гайки, шайбы, проволока» и др. [1].

Недробимые включения в потоке руды на ленточных конвейерах ГОКов являются одной из ключевых причин аварий дробилок, разрывов ленты, перегрузок узлов и вынужденных простоев. В отличие от «обычных» колебаний гран состава, недробимые фрагменты обладают высокими повреждающими последствиями (клинить рабочие органы, провоцировать каскадные остановки линии).

В этой связи современные ГОКи переходят к проактивной защите, основанной на раннем обнаружении объектов, прогнозирование их положения на ленте с последующим автоматическим удалением до попадания в элементы технологического оборудования.

Анализ публикаций, показывает, что во многих странах тематика нашего исследования достаточна актуальна, но решения и подходы, как правило находятся на экспериментальной стадии, что требует перехода от научных изысканий к внедрению в практическую область.

В работе [2] описана задача обнаружения посторонних объектов на ленточном конвейере при низкой освещённости, для промышленных галерей и шахт. Применена архитектура YOLOv4, под неустойчивое качество изображения, в связи шумами, неравномерным освещением. Определено, что корректная настройка, обучение модели обеспечивает устойчивую детекцию металлических, неметаллических объектов практически в режиме, реального времени, но не отработаны вопросы определением местоположения объекта и его удаления.

Статья [3] рассматривает обзор методов обнаружения продольных разрывов и повреждений конвейерных лент с уделением внимания причинам аварий, недробимые включения рассматриваются в исследовании, как один из ключевых факторов. В работе систематизированы датчиковые, интеллектуальные методы контроля, машинное зрение, анализ сигналов. Исследование направлено на диагностику последствий и не рассматривались вопросы, предотвращении попадания опасных объектов в технологическую линию.

Авторами исследования [4] предложен метод обнаружения посторонних объектов на конвейерной ленте на основе архитектуры NanoDet. Акцент сделан на снижении вычислительной сложности и обеспечении работы в реальном времени. Результаты показывают, что модель может использоваться только на edge-устройствах, а это критично для распределённых конвейерных систем ГОКов. Работа использует нейросетевые модели, но не затрагивает вопросы интеграции с исполнительными механизмами удаления недробимых объектов.

В работе [5] использован YOLOX для обнаружения посторонних объектов на ленточных конвейерах. Внимание акцентировано на проблеме мелких и частично перекрытых объектов в потоке материала. Результаты тестирования на экспериментальном dataset, подтверждают повышение точности по сравнению с базовыми моделями. Эффективность глубоких нейросетей позволяет решать задачи промышленного зрения, но остаётся в рамках детекции и не для принятия управляющих решений.

Авторы [6] решают задачу обнаружения и «отсева» крупных посторонних объектов на угольных конвейерных линиях. Использован метод машинного зрения с предварительным улучшением изображений с возможностью практического применения. В исследовании система удаление объектов предполагается в упрощённом виде.

В статье [7] описан метод обнаружения источников опасности, приводящих к продольному разрыву конвейерной ленты. Использованы методы глубокого обучения для выявления аварийных ситуаций. Демонстрируется подход по предотвращению аварий, а не только фиксация повреждений. Недробимые включения рассматриваются, как один из факторов, без их классификации и удаления.

Авторы [8] используют методы машинного обучения для мониторинга состояния конвейерной ленты, выявления повреждений. Рассмотрен комплекс признаков, отражающих износ оборудования. Исследование ориентировано на диагностику состояния ленты, но не решает задачу предотвращения аварий за счёт удаления недробимых объектов.

В публикации [9] показан открытый dataset изображений для задачи обнаружения посторонних объектов на конвейерах железной руды, который включает различные сценарии транспортировки и типы объектов. Оценена воспроизводимость исследований, а также возможность адаптации алгоритмов под реальные условия ГОКов, но публикация не предлагает новых алгоритмов, а служит вспомогательной базой для дальнейших исследований.

В статье [10] представлен метод обнаружения отклонения конвейерной ленты на основе улучшенной архитектуры YOLOv8, отклонение ленты может рассматриваться как источник аварийных ситуаций. Исследование может быть использовано для комплексных систем мониторинга и ориентировано на геометрию движения ленты, но не на анализ состава транспортируемого материала.

Авторами [11] предложен camera-adaptive подход к обнаружению посторонних объектов на конвейерах, с возможностью перемещения моделей между различными камерами и условиями съёмки, что актуально для протяжённых конвейерных трасс ГОКов. Работа решает инженерную проблему масштабирования, без автоматического удаления обнаруженных объектов.

Исследование [12] описан on-device обнаружения аномалий в работе конвейерных систем, применены методы анализа сигналов, машинного обучения для выявления отклонений режимов работы. Показан потенциал edge-аналитики для повышения автономности систем мониторинга, ориентированной только на режимы эксплуатации, но не на визуальное обнаружение недробимых включений.

Авторы работы [13] опробировали метод реального времени для обнаружения повреждений конвейерной ленты на основе улучшенного YOLO, показав устойчивость алгоритма при плохом качестве изображений. Исследование актуально в области безопасности конвейеров, анализирует последствия аварий, но не причины, связанные с попаданием недробимых объектов.

Авторы [14] апробировали систему высокоточной диагностики микроповреждений ленты, в комплексе с лазерным сканированием и глубоким обучением. Исследование ориентированно на выявление скрытых дефектов, после контакта с твёрдыми включениями, но не позволяет предотвращать попадание недробимых объектов в технологическую линию.

В статье [15] выполнен анализ прочности оболочек dataset ленточных конвейеров, что важно для понимания последствий воздействия недробимых включений на оборудование и целесообразность проведения профилактических мер.

Анализ современных исследований, показывает, что проблема недробимых включений на конвейерных линиях ГОКа остаётся актуальной и недостаточно решённой.

Основная масса существующих работ описывает задачи обнаружения посторонних объектов или диагностики последствий аварийных воздействий, без рассмотрения вопросов автоматического удаления опасных включений без остановки конвейера.

Представленная высокая эффективность методов машинного зрения и глубокого обучения для детекции объектов в реальном времени, не имеет возможность интеграции с исполнительными механизмами и системами управления.

Это обосновывает необходимость разработки

комплексной интеллектуальной системы защиты конвейерных линий, переходом от локальных средств контроля к предиктивному управлению аварийными рисками.

Цель исследования. Разработка и обоснование интеллектуальной системы обнаружения и автоматического удаления недробимых включений на конвейерных линиях ГОКа, обеспечивающей снижение аварийности и простоев оборудования без остановки технологического процесса.

Задачи исследования:

- анализ существующие методов обнаружения посторонних и недробимых объектов на конвейерных линиях;

- разработка алгоритма интеллектуальной детекции и классификации недробимых включений в режиме реального времени;

- обоснование интеграции системы обнаружения с исполнительными механизмами удаления включений;

- оценка потенциального эффекта внедрения системы для повышения надёжности и эффективности работы ГОКа.

Материалы и методы. *Материалы исследования:*

- технологические параметры конвейерных линий Нурказганской ОФ, полученные в ходе эксплуатации дробильно-транспортного комплекса, включая информацию о внеплановых остановках, причинах аварийных ситуаций и характеристиках недробимых включений;

- результаты опытно-технологических работ на месторождении Нурказган, отражающие требования к устойчивости транспортных и сортировочных переделов;

- экспериментальные видеоданные и изображения рудного потока на конвейерных линиях, используемые для обучения и валидации алгоритмов машинного зрения;

- справочные и нормативные данные по конструкции ленточных конвейеров, дробильного оборудования и средств автоматизации, применяемых на ГОКах.

В качестве объектов исследования рассматривались конвейерные линии рудоподготовки, зоны подачи материала в дробильные агрегаты и участки, наиболее подверженные риску попадания недробимых включений рис.1.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели в работе применён комплекс взаимодополняющих методов:

Аналитические методы-применялись для анализа причин аварийных остановок конвейерных линий и повреждений оборудования, связанных с попаданием недробимых включений, на основе производственных отчётов и эксплуатационных данных. Проведена систематизация типов опасных включений и сценариев их воздействия на оборудование.

Методы машинного зрения и глубокого обучения-использованы для обнаружения и классификации недробимых включений использованы алгоритмы компьютерного зрения на основе сверточных нейронных сетей. Обучение моделей осуществлялось на экспериментальных изображениях и видеопотоках конвейерных линий с учётом реальных условий эксплуатации (запылённость, неравномерная освещённость, движение материала).

Методы интеллектуального анализа и принятия решений-реализованы для алгоритмов оценки опасности обнаруженного объекта и прогнозирования его перемещения по конвейерной ленте с учётом скорости ленты и положения объекта. На основе этих данных формировались управляющие воздействия для исполнительных механизмов системы защиты.

Методы системной интеграции и автоматизации применены с целью рассмотрения возможности интеграции разработанных алгоритмов в состав программно-аппаратного комплекса ГОКа и действующих систем АСУ ТП, рассматривались сценарии взаимодействия подсистем «обнаружение - анализ - удаление» и требования к их работе в режиме реального времени без остановки конвейера.

Методы сравнительной оценки эффективности-использованы для оценки потенциального эффекта внедрения системы по показателям сни-

жения аварийности, уменьшения внеплановых простоев и повышения надёжности конвейерных линий по сравнению с традиционными средствами защиты.



Рис.1 - Конвейеры рудоподготовки, зона подачи материала в дробильные агрегаты

Обсуждение и результаты.

Анализ существующие методов обнаружения посторонних и недробимых объектов на конвейерных линиях.

В настоящее время на конвейерных линиях рудоподготовки применяются системы защиты, основанные на использовании металлодетекторов и электромагнитных устройств, предназначенных для предотвращения попадания металлических недробимых включений в дробильное оборудование.

Такие системы включают электромагнитную рамку-детектор, устанавливаемую на конвейер, магнитные уловители, размещаемые в зоне пересыпа материала или перед дробильными агрегатами.

Эти решения позволяют фиксировать наличие металлических включений в рудном потоке и в ряде случаев предотвращать повреждение оборудования. На производстве значительная часть таких систем требует остановки конвейерной ленты и ручного удаления обнаруженных объектов, со снижением производительности, ростом простоев, увеличением эксплуатационных рисков.

В настоящей работе предлагается комплексная интеллектуальная система обнаружения и удаления недробимых включений, обеспечивающая автоматическое реагирование на опасные объекты без остановки конвейерной линии. В отличие от существующих решений, предлагаемая

система реализует замкнутый контур управления, включающий этапы обнаружения, оценки опасности, прогнозирования положения объекта и автоматического управления исполнительными механизмами.

Система основана на использовании электромагнитной рамки-детектора для первичного обнаружения металлических включений, а также программного модуля обработки сигналов, который определяет момент и режим включения электромагнитного уловителя. Уловитель устанавливается в зоне пересыпа рудного материала и обеспечивает извлечение недробимого включения из потока в момент его отделения от ленты.

Функциональная схема системы рис.2 включает следующие основные элементы:

- конвейерная линия рудоподготовки, по которой осуществляется непрерывная транспортировка руды;

- электромагнитная рамка-детектор, установленная на конвейере и обеспечивающая непрерывный контроль рудного потока;

- программно-логический модуль анализа, принимающий сигналы детектора и выполняющий расчёт времени подхода объекта к зоне удаления с учётом скорости движения ленты;

- электромагнитный уловитель, расположенный в зоне пересыпа материала и предназначенный для автоматического извлечения металлических включений;

- система управления (ПЛК/АСУ ТП), обеспечивающая синхронизацию работы всех элементов и регистрацию событий.



Рис.2 - Функциональная схема системы обнаружения и автоматического удаления недробимых включений на конвейерной линии

Принцип работы схемы заключается в следующем: при обнаружении недробимого включения рамка-детектор формирует сигнал, который поступает в программно-логический модуль. На основе данных о скорости конвейера рассчитывается момент включения уловителя. В зоне пересыпа уловитель извлекает опасный объект из потока материала, после чего система автоматически возвращается в исходный режим.

Предлагаемая система отличается:

- упреждающим характером обнаружения и реагирования;

- отсутствием необходимости остановки конвейерной линии;

- снижением аварийности и внеплановых простоев;

- возможностью интеграции в существующие системы АСУ ТП ГОКа.

Разработка алгоритма интеллектуальной детекции и классификации недробимых включений в режиме реального времени.

Разработанный алгоритм предназначен для непрерывного контроля рудного потока на конвейерной ленте и решения задач:

- детекция - обнаружение недробимого вклю-

чения в потоке (выделение объекта на изображении или по сигналу датчика);

- классификация опасности - определение типа включения и требуемого действия (удаление/останов/сигнал).

Алгоритм имеет возможность работать в режиме реального времени по принципу: сбор данных → анализ → прогноз → управляющее воздействие → подтверждение результата.

Алгоритм использует несколько источников данных:

- видеопоток с камер, установленных над лентой (для немагнитных включений и контроля негабарита);

- сигналов с датчиков (металлодетектор/индукционный канал) для металлических включений;

- скорость ленты (энкодер, SCADA/АСУ ТП) - (для расчёта времени подхода объекта к зоне удаления);

- калибровочные параметры (ROI, масштаб) - (привязка изображения к реальной длине ленты и зоне контроля).

Описание работы алгоритма рис.3.

1. Предобработка и синхронизация. Видеопоток проходит предобработку (стабилизация, фильтрация шумов, нормализация освещения и контрастности), параллельно выполняется синхронизация с датчиками и SCADA (выравнивание временных меток, учёт задержек, буферизация событий).

2. Детекция объекта. Выполняется детекция (нейросетевой детектор или ML-модель), выдает:

- координаты объекта (BBOX);

- предварительный класс (например,: «металл», «негабарит», «посторонний предмет»);



Рис.3 - Алгоритм интеллектуальной детекции и классификации недробимых включений в режиме реального времени

3. Трекинг (сопровождение) объекта. После обнаружения объект получает персональный ID, отслеживается на последовательности кадров, что позволяет:

- избежать повторной регистрации одного и того же объекта;

- уточнять положение и скорость движения

объекта относительно ленты;

-корректно прогнозировать момент подхода к зоне удаления.

4. Классификация опасности. На основе визуальных признаков, данных датчика формируем оценку опасности:

- тип: магнитный / немагнитный;

- размер/масса (оценка по габаритам в пикселях и масштабу);

- риск: низкий / средний / высокий.

Пример:

- магнитный объект + высокий score → команда на удаление магнитным устройством;

- негабарит/немагнитный объект → сигнал оператору или аварийный сценарий (в зависимости от регламента).

5. Прогноз времени подхода к зоне удаления. Ключевой элемент реального времени - расчёт момента, когда объект достигнет зоны пересыпа/удаления выражение 1:

$$t_{arrive} = dist/v_{be}l \quad (1)$$

где dist - расстояние до зоны удаления, $v_{bel}t$ - скорость ленты.

Исполнительное устройство включается в нужный момент.

6. Логика решения и управление исполнительным механизмом. На основании класса и уровня риска алгоритм выбирает действие:

- удалить (команда на исполнителя: магнит/отклоняющий механизм);

- остановить (если объект критический и не удаляется);

- сигнал оператору (если требуется подтверждение/ручная проверка).

Направляется команда для ПЛК: включение исполнительного устройства в нужный интервал времени, фиксация события, контроль статуса.

7. Обратная связь. После выполнения действия система фиксирует:

- факт удаления (по датчику/камере);

- фото/видео события;

- временные метки и параметры;

- диагностические признаки (ложное срабатывание, промах, повтор).

В дальнейшем показатели, используются для повышения точности: корректировки порогов, дообучения модели, обновления правил классификации.

Обоснование интеграции системы обнаружения с исполнительными механизмами удаления недробимых включений.

Анализ существующих систем защиты конвейерных линий показывает, что решения, в основном ограничиваются обнаружением недробимых включений, что не обеспечивает снижения аварийных рисков. Сама фиксация факта наличия опасного объекта без последующего автоматического воздействия, требует ручного вмешательства оператора, остановки конвейера и на практике не обеспечивает предотвращает повреждения дробильного или иного оборудования.

Совокупность систем обнаружения и исполнительных механизмов удаления (электромагнитные уловители, отклоняющие устройства, механизмы сброса) обеспечивают переход от ручного подхода к автоматизированной защите оборудования. Обнаружение недробимого объекта автоматически сопровождается формированием управляющего воздействия, на его удаление (зона пересыпа, бункер), без остановки конвейера.

Фактор эффективности состоит в синхронизации алгоритмов обнаружения с кинематикой конвейерной линии, к тому же прогнозирование времени подхода объекта к зоне удаления активирует исполнительные механизмы в заданное время обеспечивая экономию энергопотребления, износа оборудования, вероятности ложных срабатываний.

Анализ данных в табл.1 показывает, что интеграция систем обнаружения с исполнительными механизмами автоматического удаления недробимых включений повышает надёжность конвейерных линий.

По таким показателям (внеплановые остановки, повреждения дробилки, износ конвейерной ленты, потребность в ручном вмешательстве персонала и риск вторичных аварий) снижение уровня эксплуатационных рисков по сравнению с вариантом, основанным только на обнаружении. Целесообразность перехода от пассивного мониторинга к активной системе защиты, обеспечивает автоматическое реагирование без остановки конвейера.

Таблица 1 - Влияние интеграции систем обнаружения и удаления на показатели надёжности конвейерных линий

Показатель	Без интеграции (только обнаружение)	С интеграцией (обнаружение + удаление)
Внеплановые остановки	5	2
Повреждения дробилки	4	1
Износ конвейерной ленты	4	2
Ручное вмешательство персонала	5	1
Риск вторичных аварий	4	1

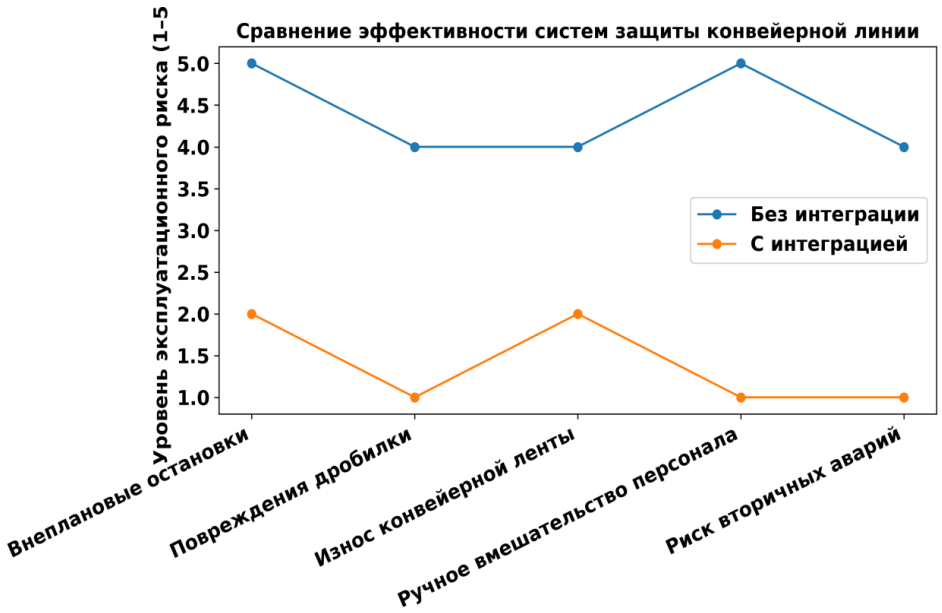


Рис.4 - Сравнение эффективности систем защиты конвейерной линии

График рис.4 иллюстрирует снижение эксплуатационных рисков при переходе от системы, на обнаружении недробимых включений, к интегрированной системе «обнаружение + автоматическое удаление».

По всем показателям - внеплановые остановки, повреждения дробилки, износ ленты, ручное вмешательство персонала, риск вторичных аварий - интегрированный подход показывает более низкие значения риска, подтверждая техническую и эксплуатационную эффективность.

Оценка потенциального эффекта внедрения

системы для повышения надёжности и эффективности работы ГОКа.

Оценка потенциального эффекта внедрения системы выполнена на основе анализа эксплуатационных данных конвейерных линий, представленных [1], а также типовых показателей аварийности и простоев дробильно-транспортных комплексов ГОКов.

В качестве критериев эффективности рассматривались надёжность оборудования, снижение аварийных ситуаций, уменьшение ручного вмешательства персонала, совокупные эксплуатационные потери.

В табл.2 представлена оценка экономического эффекта от внедрения системы обнаружения и автоматического удаления недробимых включений на конвейерных линиях на реальных эксплуатационных данных Нурказгана, дополненных обоснованными среднеотраслевыми коэффициентами, полученных из открытых источников по средним показателям предприятий ГОК Республики Казахстан.

Представлены ключевые составляющие эффекта: сокращение внеплановых простоев, увеличение дополнительного выпуска продукции, снижение затрат на ремонты дробильного оборудования и уменьшение ручных вмешательств персонала, суммарный валовый и чистый экономический эффект с учётом эксплуатационных затрат системы, расчётный срок окупаемости капитальных вложений.

Рассчитанные данные в табл.2 подтверждают экономическую целесообразность внедрения системы, повышения эффективности работы ГОКа.

Таблица 2 - Потенциальный эффект внедрения системы обнаружения и удаления недробимых включений

Показатель	До внедрения	После внедрения (оценка)
Внеплановые простои, ч/год	420	180
Аварийные остановки, раз/год	38	15
Повреждения дробилок, раз/год	12	4
Ручные вмешательства персонала, раз/год	95	30
Эксплуатационные потери, %	100	65

На графике рис.5 представлены значения эксплуатационных показателей по данным производственного отчёта по месторождению Нурказган.

Все числовые значения, использованные для построения графика, получены в ходе анализа отчётной документации и отражают фактические показатели работы дробильно-транспортного комплекса.

По результатам исследований внеплановые простои планируются сократить с 420 ч/год до 180 ч/год, количество аварийных остановок - с 38 до 15 раз/год, повреждения дробилок - с 12 до 4 случаев/год, а число ручных вмешательств персонала - с 95 до 30 раз/год. Эксплуатационные потери, принятые в отчёте за 100 % до внедрения, после внедрения составят 65 %.

Представленный график наглядно иллюстрирует достигаемый эффект после внедрения системы обнаружения и автоматического удаления недробимых включений на конвейерных линиях

В ходе исследования получены результаты, технических и алгоритмических решений в области защиты конвейерных линий от недробимых включений в которых научная новизна заключается в разработке и обосновании

комплексного подхода, основанного на интеграции системы интеллектуального обнаружения недробимых включений с исполнительными механизмами их автоматического удаления.

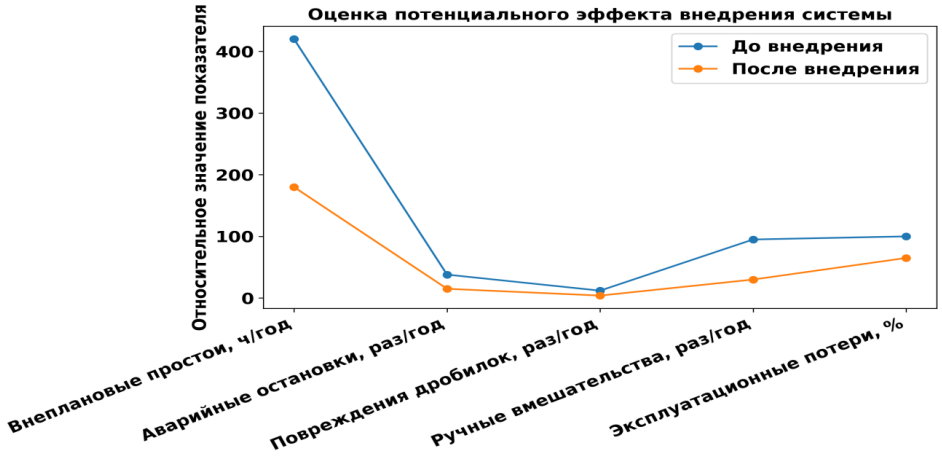


Рис.5 - Оценка потенциального эффекта внедрения системы обнаружения и автоматического удаления недробимых включений на конвейерных линиях

Существующие решения, ориентированы преимущественно на локальный контроль или аварийную сигнализацию, разработанный подход реализует замкнутый контур «обнаружение – прогноз – управляющее воздействие», обеспечивая предотвращение аварийных ситуаций без остановки конвейерной линии. Количественная оценка эффекта внедрения системы на основе фактических эксплуатационных данных отчётов Нурказганского месторождения, позволила связать алгоритмические решения с реальными показателями надёжности, эффективности оборудования.

Результаты настоящего исследования расширяют методологию интеллектуальной автоматизации дробильно-транспортных комплексов, создают основу для применения и внедрения адаптивных систем промышленной безопасности нового поколения.

Выводы. В ходе выполнения исследования последовательно решены задачи, направленные на повышение надёжности и эффективности работы конвейерных линий рудоподготовки за счёт предотвращения попадания недробимых включений в дробильное оборудование.

1. Выполнен анализ существующих методов обнаружения посторонних и недробимых включений на конвейерных линиях. Установлено, что большинство применяемых технических решений ориентировано на локальную детекцию и аварийную сигнализацию, не обеспечивая автоматизированного предотвращения аварийных ситуаций. Выявлены ограничения подходов, связанных с необходимостью остановки конвейера, высоким уровнем ручного вмешательства персонала.

2. Разработан алгоритм интеллектуальной детекции, классификации недробимых включений в режиме реального времени, реализующий замкнутый контур «обнаружение – анализ - прогноз - управление», обеспечивающий автоматическое принятие решений, синхронизацию управления исполнительными механизмами удаления включений без остановки технологического процесса.

3. Обоснована и реализована интеграция системы обнаружения с исполнительными механизмами автоматического удаления недробимых включений, позволяющая существенно снизить аварийность и повысить техническую готовность дробильно-транспортного комплекса.

4. Выполнена оценка эффективности внедрения системы на основе отчётных данных по

месторождению Нурказган. Количественно подтверждено возможность сокращения внеплановых простоев с 420 до 180 ч/год, аварийных остановок - с 38 до 15 раз/год, повреждений дробилок - с 12 до 4 случаев/год, ручных вмешательств персонала - с 95 до 30 раз/год, а эксплуатационных потерь - со 100 % до 65 %.

Практическая значимость исследования заключается в возможности внедрения и масштабирования разработанной системы на действующих конвейерных линиях ГОКов Республики Казахстан без изменения базовой технологической схемы.

Дальнейшее развитие исследования целесообразно направить на адаптивное обучение алгоритмов детекции на основе накопленных эксплуатационных данных, расширение системы на немагнитные включения, разработку цифрового двойника конвейерной линии, прогнозирования рисков, оптимизации режимов работы.

Финансирование: Статья подготовлена по результатам исследований в рамках ПЦФ BR28713037 «Разработка программно-аппаратного комплекса на базе технологий искусственного интеллекта для управления процессом флотации на горно-обогатительных предприятиях».

Литература

1. Отчет о НИР ««Разработка программно-аппаратного комплекса на базе технологий искусственного интеллекта для управления процессом флотации на горно-обогатительных предприятиях», Астана. -2025. -310с. URL: https://smart-industry.kz/programma/. -Дата обращения: 20.12.2025.

2. Chen Y., Sun X., Xu L., Ma S., Li J., Pang Y., Cheng G. Application of YOLOv4 Algorithm for Foreign Object Detection on a Belt Conveyor in a Low-Illumination Environment//Sensors. -2022. -Vol.22(18):6851. DOI 10.3390/s22186851.

3. Guo X., et al. Belt Tear Detection for Coal Mining Conveyors//Micromachines. -2022. -Vol.13(3):449. DOI 10.3390/mi13030449.

4. Miao D., Wang Y., Yang L., Wei S. Foreign Object Detection Method of Conveyor Belt Based on Improved NanoDe//IEEE Access. -2023. -Vol.11. -P.23046–23052. DOI 10.1109/ACCESS.2023.3253624.

5. Yao R., Qi P., Hua D., Zhang X., Lu H., Liu X. Foreign Object Detection Method for Belt Conveyors Based on an Improved YOLOX Model//Technologies. -2023. -Vol.11(5):114. DOI 10.3390/technologies11050114.

6. Dai L., Zhang X., Gardoni P., Lu H., Liu X., Królczyk G., Li Z. A New Machine Vision Detection Method for Identifying and Screening Out Large Foreign Objects on Coal Belt Conveyor Lines//Complex & Intelligent Systems. -2023. -Vol.9. -P.5221-5234. DOI 10.1007/s40747-023-01011-9.

7. Wang Y., Miao Ch., Miao D., Yang D., Zheng Y. Hazard Source Detection of Longitudinal Tearing of Conveyor Belt Based on Deep Learning// PLOS ONE. -2023. -Vol.18(4): e0283878. DOI 10.1371/journal.pone.0283878.

8. Muhammad S., et al. A Surface Defect Detection System for Industrial Conveyor Belt Inspection Using Apple’s TrueDepth Camera Technology// Applied Sciences. -2024. -Vol.16(2): 609. DOI 10.3390/app16020609.

9. Frederico L Martins de Sousa , Thiago E Alves de Oliveira , Saul E Delabrida Silva , Bruno Nazário Coelho. Image Dataset for Foreign Object Detection in Iron Ore Conveyor Belt Systems//Data in Brief. -2025. -Vol.60: 11537. DOI10.1016/j.dib.2025.111537.

10. Ni Y., Cheng H., Hou Y., Guo P. Study of Conveyor Belt Deviation Detection Based on Improved YOLOv8 Algorithm//Scientific Reports. -2024. -Vol.14:26876. DOI 10.1038/s41598-024-75542-7.

11. Peng F., Hao K., Lu X. Camera-Adaptive Foreign Object Detection for Coal Conveyor Belts// Applied Sciences. -2025. -Vol.15(9):4769. DOI 10.3390/app15094769.

12. Martinez-Rau L.S., Zhang Y., Oelmann B., Bader S. On-Device Anomaly Detection in Conveyor Belt Operations// IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement. -2025. -Vol.4:2500609. DOI 10.1109/OJIM.2025.3613073.

13. Ling J., Fu. Zh., Yuan X. Lightweight Coal Mine Conveyor Belt Foreign Object Detection Based on Improved YOLOv8n//Scientific Reports. -2025. -Vol.15: 10361. DOI 10.1038/s41598-025-87848-1.

14. Li Y., Yang F., Dong J., et al. Precision Detection of Micro-Damage on Conveyor Belt Integrating Laser Scanning and Deep Learning// Scientific Reports. -2025. -Vol.15: 38946. DOI 10.1038/s41598-025-22818-1.

15. Yurchenko V.V., Smagulov A.S., Reshetnikova O.S., Zharkevich O.M., Mussayev M.M. Investigation of Strength of Belt Conveyor Roller Bearing Shells// Material and Mechanical Engineering Technology. -2025. -No.2. -P.80-84. DOI 10.52209/2706-977X_2025_2_80.

Referenses

1. Otchet o NIR «Razrabotka programmno-apparatnogo kompleksa na baze tehnologij iskusstvennogo intellekta dlja upravlenija processom flotacii na gorno-obogatitel’ nyh predprijatijah», Astana. -2025.-310s. URL: https://smart-industry.kz/programma/. -Data obrashhenija: 20.12.2025. [in Russian]

2. Chen Y., Sun X., Xu L., Ma S., Li J., Pang Y., Cheng G. Application of YOLOv4 Algorithm for Foreign Object Detection on a Belt Conveyor in a Low-Illumination Environment//Sensors. -2022. -Vol.22(18):6851. DOI 10.3390/s22186851.

3. Guo X., et al. Belt Tear Detection for Coal Mining Conveyors//Micromachines. -2022. -Vol.13(3):449. DOI 10.3390/mi13030449.

4. Miao D., Wang Y., Yang L., Wei S. Foreign Object Detection Method of Conveyor Belt Based on Improved NanoDe//IEEE Access. -2023. -Vol.11. -P.23046–23052. DOI 10.1109/ACCESS.2023.3253624.

5. Yao R., Qi P., Hua D., Zhang X., Lu H., Liu X. Foreign Object Detection Method for Belt Conveyors Based on an Improved YOLOX Model//Technologies. -2023. -Vol.11(5):114. DOI 10.3390/technologies11050114.

6. Dai L., Zhang X., Gardoni P., Lu H., Liu X., Królczyk G., Li Z. A New Machine Vision Detection Method for Identifying and Screening Out Large Foreign Objects on Coal Belt Conveyor Lines//Complex & Intelligent Systems. -2023. -Vol.9. -P.5221-5234. DOI 10.1007/s40747-023-01011-9.

7. Wang Y., Miao Ch., Miao D., Yang D., Zheng Y. Hazard Source Detection of Longitudinal Tearing of Conveyor Belt Based on Deep Learning// PLOS ONE. -2023. -Vol.18(4): e0283878. DOI 10.1371/journal.pone.0283878.

8. Muhammad S., et al. A Surface Defect Detection System for Industrial Conveyor Belt Inspection Using Apple’s TrueDepth Camera Technology// Applied Sciences. -2024. -Vol.16(2): 609. DOI 10.3390/app16020609.

9. Frederico L Martins de Sousa , Thiago E Alves de Oliveira , Saul E Delabrida Silva , Bruno Nazário Coelho. Image Dataset for Foreign Object Detection in Iron Ore Conveyor Belt Systems//Data in Brief. -2025. -Vol.60: 11537. DOI10.1016/j.dib.2025.111537.

10. Ni Y., Cheng H., Hou Y., Guo P. Study of Conveyor Belt Deviation Detection Based on Improved YOLOv8 Algorithm//Scientific Reports. -2024. -Vol.14:26876. DOI 10.1038/s41598-024-75542-7.

11. Peng F., Hao K., Lu X. Camera-Adaptive Foreign Object Detection for Coal Conveyor Belts// Applied Sciences. -2025. -Vol.15(9):4769. DOI 10.3390/app15094769.

12. Martinez-Rau L.S., Zhang Y., Oelmann B., Bader S. On-Device Anomaly Detection in Conveyor Belt Operations// IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement. -2025. -Vol.4:2500609. DOI 10.1109/OJIM.2025.3613073.

13. Ling J., Fu. Zh., Yuan X. Lightweight Coal Mine Conveyor Belt Foreign Object Detection Based on Improved YOLOv8n//Scientific Reports. -2025. -Vol.15: 10361. DOI 10.1038/s41598-025-87848-1.

14. Li Y., Yang F., Dong J., et al. Precision Detection of Micro-Damage on Conveyor Belt Integrating Laser Scanning and Deep Learning// Scientific Reports. -2025. -Vol.15: 38946. DOI 10.1038/s41598-025-22818-1.

15. Yurchenko V.V., Smagulov A.S., Reshetnikova O.S., Zharkevich O.M., Mussayev M.M. Investigation of Strength of Belt Conveyor Roller Bearing Shells// Material and Mechanical Engineering Technology. -2025. -No.2. -P.80-84. DOI 10.52209/2706-977X_2025_2_80.

Сведения об авторах

Акишев К.М. -к.т.н., ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: akmail04cx@mail.ru;

Подвалов А.Ю. - к.г.н, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: a.podvalov@ag-tech.kz;

Зейнуллин А.А.- д.т.н., профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: karim_57@mail.ru;

Айбульдинов Е.К. - доктор PhD, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: elaman_@mail.ru;

Нурмаганбетов А.С.-кандидат технических наук, доктор философии (PhD), ассоциированный профессор, ТОО «AG TECH», Астана, Казахстан, e-mail: a.nurmaganbetov@ag-tech.kz;

Оспанова М.К.- к.ф-м.н., Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: ospanova_madi_59@mail.ru;

Чагай М. А. - бакалавр, ТОО «AG Tech», Астана, Казахстан, e-mail: m.chagay@ag-tech.kz;

Айтиева М.И.-бакалавр, ТОО «AG Tech», Астана, Казахстан, e-mail: m.aitiyeva@ag-tech.kz;

Хусаинова С.М. - докторант, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, e-mail: sabina.maratovna@gmail.com.

Мылтыкбаева Л.А.- к.т.н., Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: L.multykbayeva@gmail.com.

Information about the authors

Akishev K. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: akmail04cx@mail.ru;

Podvalov A.- Candidate of Geographical Sciences, AG Tech LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: a.podvalov@ag-tech.kz;

Zeynullin A.- Doctor of Technical Sciences, Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: karim_57@mail.ru;

Aybuldinov E.- PhD, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: elaman_@mail.ru;

Nurmaganbetov A.- Candidate of Technical Sciences, Doctor of Philosophy (PhD) AG Tech LLP, Astana, Kazakhstan, e-mail: a.nurmaganbetov@ag-tech.kz;

Ospanova M.K. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Busines, Astana, Kazakhstan, e-mail: ospanova_madi_59@mail.ru;

Chagai M. - Bachelor’ s degree, AG Tech, Astana, Kazakhstan, e-mail: m.chagay@ag-tech.kz;

Aitiyeva M.- Bachelor’s degree, AG Tech, Astana, Kazakhstan, e-mail: m.aitiyeva@ag-tech.kz;

Khusainova S.- Doctoral student, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan, sabina.maratovna@gmail.com;

Myltykbaeva L - Candidate of Technical Sciences, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: L.multykbayeva@gmail.com.

ҒТАМР 52.01.93 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1388**

ӨНДІРІСТІК ЖАРАҚАТТАНУ ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ФОСФОР ӨНЕРКӘСІБІ КӘСІПОРЫНДАРЫНДАҒЫ ЕҢБЕКТІ ҚОРҒАУ ЖӘНЕ КӘСІПТІК ТӘУЕКЕЛДЕРДІ БАСҚАРУ ЖАЙ КҮЙІНІҢ КӨРСЕТКІШІ РЕТІНДЕ

Л.М. Актаева, А.Б. Бекмагамбетов, А.М. Рахметова, Г.А. Насырова, Э.А. Құлмағамбетова, Г.К. Алшынбекова, А.Т. Шілменова, Н.Т. Сағындықова

Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институты ШМҚ РМК, Астана, Қазақстан

Корреспондент-автор: aigul.shilmenova@gmail.com

Мақалада еңбек жағдайларын бағалау мен кәсіптік тәуекелдерді басқару тұрғысынан 2024 жылы фосфор өнеркісібі кәсіпорындарындағы жарақаттанудың жай-күйі қарастырылған. Өндірістік жарақаттану санитарлық-гигиеналық еңбек жағдайларын, кәсіптік қызметтің ерекшелігін және жұмысшының еңбек процесінің субъектісі ретіндегі жағдайын көрсететін кәсіптік тәуекелдің негізгі өлшемдерінің бірі ретінде қараастырылады. Зерттеудің мақсаты - жазатайым оқиғаларды тіркеудің ерекшеліктерін анықтау және қауіпсіздік көрсеткіштерінің сенімділігіне әсер ететін факторларды анықтау. Әдістемелік негіз-жазатайым оқиғалар туралы ресми есептілік пен құжаттық материалдарды талдау. Тіркелген 65 оқиғаның тек аз ғана бөлігі жұмыс міндеттерін орындаумен байланыста екені анықталды, бұл тіркеудің жеткіліксіздігін және кәсіби тәуекелдердің нақты деңгейінің бұрмаланғанын көрсетеді. Қызметкерлердің жасын, еңбек өтілін және кәсіби тәжірибесін ескере отырып, бес өндірістік бөлімшедегі оқиғалардың салыстырмалы талдауы жүргізілді. Нәтижелер қолданыстағы бақылау жүйесінде еңбек қауіпсіздігін объективті бағалау мүмкіндігінің шектеулі екенін көрсетеді. Еңбек қауіпсіздігін қамтамасыз етудің реттеуші және ұйымдастырушылық тетіктерін жетілдіру және тәуекелге негізделген тәсілді енгізу қажеттілігі туралы қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: еңбек жағдайлары, еңбек қауіпсіздігі және еңбекті қорғау, өндірістік жарақаттану, тұрмыстық жарақаттану, жазатайым оқиғалар, кәсіби тәуекелділік.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ТРАВМАТИЗМ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ОХРАНЫ ТРУДА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМИ РИСКАМИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ФОСФОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Л.М. Актаева, А.Б. Бекмагамбетов, А.М. Рахметова, Г.А. Насырова, Э.А. Кульмагамбетова, Г.К. Алшынбекова, А.Т. Шилменова, Н.Т. Сагиндикова

РГП на ПХВ Республиканский научно-исследовательский институт по охране труда Министерства труда и социальной защите населения Республики Казахстан, Астана, Казахстан, e-mail: aigul.shilmenova@gmail.com

В статье рассмотрено состояние травматизма на предприятиях фосфорной промышленности в 2024 г. С позиции оценки условий труда и управления профессиональными рисками. Производственный травматизм рассматривается как один из ключевых критериев профессионального риска, отражающий санитарно-гигиенические условия труда, специфику профессиональной деятельности и состояние работника как субъекта трудового процесса. Целью исследования заключается в выявлении особенностей учета несчастных случаев и определения факторов, влияющих на достоверность показателей безопасности. Методологической основой послужили анализ официальной отчетности и документальных материалов по несчастным случаям. Установлено, что при общем количестве 65 зарегистрированных происшествий лишь незначительная часть связана с выполнением трудовых обязанностей, что свидетельствует о недостаточной полноте регистрации и искажении реального уровня профессиональных рисков. Проведен сравнительный анализ происшествий в пяти производственных подразделениях с учетом возраста, стажа и профессиональной

принадлежности работников. Полученные результаты указывают на ограниченные возможности объективной оценки состояния охраны труда в рамках действующей системы контроля. Сделан вывод о необходимости совершенствования нормативно правовых и организационных механизмов обеспечения безопасности труда и внедрения риск-ориентированного подхода.

Ключевые слова: условия труда, безопасность и охрана труда, производственный травматизм, бытовой травматизм, несчастные случаи, профессиональный риск.

OCCUPATIONAL INJURIES AS AN INDICATOR OF THE STATE OF OCCUPATIONAL SAFETY AND PROFESSIONAL RISK MANAGEMENT AT ENTERPRISES OF THE PHOSPHORUS INDUSTRY OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

L.M. Aktayeva, A.B. Bekmagambetov, A.M. Rakhmetova, G.A. Nasyrova, E.A. Kulmagambetova, G.A. Alshynbekova, A.T Shilmenova✉, N.T. Sagindikova

RSE at the National Research Institute for Occupational Safety of the Ministry of Labor and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan, e-mail: aigul.shilmenova@gmail.com

This article examines the injury rate at phosphorus industry enterprises in 2024 from the perspective of assessing working conditions and managing occupational risks. Occupational injuries are considered a key criterion for occupational risk, reflecting sanitary and hygienic working conditions, the specific nature of professional activity and the worker's status as a subject of the labor process7 the aim of the study is to identify the characteristics of accident recording and determine the factors affecting the reliability of safety indicators. The methodological basis was an analysis of official reports and documentary materials on accidents. It was found that, out of a total of 65 registered incidents, only a small proportion were related to the performance of work duties, indicating insufficient registration and a distortion of the actual level of occupational risks. A comparative analysis of incidents in five production units was conducted, considering the age, length of service and professional affiliation of workers. The results obtained indicate the limited possibilities for an objective assessment of the state of occupational safety within the framework of the current control system. The study concludes that it is necessary to improve regulatory and organization mechanisms for ensuring occupational safety and implement a risk-based approach.

Keywords: working conditions, occupational safety and health, industrial injuries, domestic injuries, accidents, occupational risks.

Кіріспе. Өндірістік жарақаттар еңбек жағдайларының жай-күйін және кәсіпорындардағы кәсіптік тәуекелдерді басқарудың тиімділігін көрсететін негізгі еңбек қауіпсіздігі мәселесі. Өндірістік жарақат - жұмысшының еңбек міндеттерін орындау кезінде денсаулығына келтірілген және уақытша немесе тұрақты мүгедектікке әкеп соққан зардап ретінде анықталады [1]. Өндірістік жарақаттардың жиілігі өндірістік үдерістердің қауіпсіздігінің және еңбекті қорғау жүйесінің жұмыс істеу сапасының ажырамас көрсеткіші болып табылады.

Өндірістік жарақаттануды зерттеу еңбек қауіпсіздігі мен еңбекті қорғаудың, қоғамдық денсаулық сақтаудың және әлеуметтік-экономикалық дамудың өзекті мәселесі болып табылады. Өйткені өндірістегі жазатайым оқиғалар айтарлықтай адами және экономикалық шығындармен қатар жүреді. Бұл мәселе әсіресе өндірістік қауіптілігі жоғары салаларда, зиянды және қауіпті өндіріс жағдайында анық көрінеді [2-4].

Жазатайым оқиғалар мен кәсіптік аурулардың салдарынан Халықаралық еңбек ұйымының (бұдан әрі - ХЕҰ) деректері бойынша әлемде 3 миллионға жуық адам қаза табады, ал өндірістегі жазатайым оқиғалардың жалпы саны жылына 374 млн-нан асады [2]. Сонымен қатар, әлемнің көптеген елдерінің ғалымдарының зерттеулері өндірістік орта тудыратын зиянды және қауіпті факторлар денсаулықтың ауытқуы себеп-салдарының 30%-на дейін әсер

ететінін көрсетеді [3,4]. Бұл деректер мәселенің жаһандық сипатын, әсіресе өндірістік қауіптілігі жоғары салаларда кәсіби тәуекелдерді басқару тәсілдерін жетілдіру қажеттілігін құптайды [5]. ДДҰ мәліметтері бойынша әлемнің көптеген елдерінде «жұмыспен байланысты денсаулық мәселері себебінен» болған экономикалық шығындар ЖҰӨ-нің 4-6% құрайды [6].

Өндірістік жарақаттану деңгейі еңбек процесін ұйымдастырудың қазіргі жағдайы мен еңбек сипатына (қауіпті, ауыр, жүйке-күйзелістік, ауысымды жұмыс кестесі) байланысты. Бұл көрсеткіш жаңа қауіпсіз технологиялар мен жабдықтарды енгізуге, өндіріс мәдениетін арттыруға және тағы да басқа өзгерістерге жылдам әрекет етеді, басқаша айтқанда, өндірістік жарақат еңбек жағдайлары мен еңбекті қорғаудың жай-күйінің сезімтал индикаторы ретінде еңбекті қорғауды басқарудың жаңа тәсілі негізделген кәсіби тәуекелді бағалаудың маңызды өлшемшарты болуы тиіс.

Халықаралық тәжірибеде өндірістік жарақаттану деңгейін бағалау және салыстыру үшін салыстырмалы көрсеткіштер, соның ішінде 100 000 жұмыскерге шаққанда зардап шеккендер мен қаза тапқандар жиілігінің коэффициенті қолданылады.

Қазақстанда 2022 жылдың қорытындысы бойынша жазатайым оқиғалардан зардап шеккендердің жиілік коэффициенті 100 000 қызметкерге 44 адамды, қаза тапқандардың жиілік коэффициенті-3,7 (2020 жылы-тиісінше 39 және 3,9) құрады. Салыстыру үшін, дамыған елдерде зардап шеккендердің жиілік коэффициенті едәуір жоғары: АҚШ- 900 және 5,3, Италия-1413 және 3,4, Франция-2931 және 2,5, бұл ретте өлімге әкелетін жарақаттану көрсеткіштері өз еліміздің салыстырғанда бірдей немесе төмен көрсеткішке ие [7,8].

Өндірістегі жазатайым оқиғалардың Еуропалық статистикасында [9], 2018 жылы Еуро Одақ елдерінде шамамен 3,3 миллион өлімге алып келмейтін жарақаттар орын алды, бұл кем дегенде төрт күнтізбелік күн жұмыссыз қалуға алып келді. АҚШ-та Ұлттық қауіпсіздік кеңесінің мәліметтері бойынша, 2019 жылы 4,65 миллион өндірістік жарақат тіркелді, нәтижесінде 105 миллион өндірістік күн жоғалды және өндірістік жарақаттарды емдеудің жалпы құны 171 миллиард долларға бағаланған. Еуропалық Одақ елдерінде, шетелдік авторлардың мәліметтері бойынша, жыл сайын жұмыс орындарында өндіріске байланысты себептер бойынша 350 мыңға жуық адам қаза табады [10]. Ресейде 2022 жылы өндірісте ауыр зардаптармен 4639 жазатайым оқиға болды, оның ішінде 991 адам қайтыс болды [11,12].

Қазақстан Республикасы Ұлттық статистика бюросының деректеріне сәйкес, экономика саласында бір және одан да көп жұмыс күніне шаққанда еңбек қабілеттілігінен айырылған зардап шегушілердің ең көп саны, оның ішінде өлім-жітім жағдайлары, өңдеу өнеркәсібінде 800 жағдай тіркелді, бұл жазатайым оқиғалардың жалпы санының 32,4% құрайды, оның ішінде 50 топтық жазатайым оқиға орын алды. Бұл салада 36 өлім тіркелді, сондай-ақ ауыр жарақат басым. Зардап шеккендердің ең көп саны Қарағанды, Ұлытау және Шығыс Қазақстан облыстарында байқалады, бұл өнеркәсіптік кәсіпорындардың тығыз шоғырлануына байланысты [13].

Өңдеу секторына жататын фосфор өнеркәсібінің кәсіпорындары күрделі, технологиялық үрдістермен, химиялық қауіпті фосфор қосылыстарының әсерімен, өрт пен жарылыс қаупінің жоғарылыуымен, сондай-ақ өндірістік үдерістерді механикаландыру мен автоматтандырудың жеткіліксіз деңгейімен сипатталады. Бұл жағдайда өндірістік жарақат еңбекті қорғау жағдайы мен кәсіби тәуекелдерді басқару тиімділігінің маңызды көрсеткіші болып табылады.

Осы зерттеуде фосфор өнеркәсібіндегі өндірістік жарақаттану, жазатайым оқиғалардың жасына, жұмыс өтіліне, кәсібіне және жарақаттарды оқшауланыуына қарай бөлінуін ескере отырып талданады, бұл жұмысшылардың ең осал топтарын және өндірістің маңызды аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді.

Зерттеудің мақсаты-еңбекті қорғау және кәсіптік тәуекелдерді басқару жай-күйінің индикаторы ретінде фосфор өнеркәсібі кәсіпорындарын-

дағы өндірістік жарақаттануды талдау, жарақаттануға әсер ететін факторларды анықтау және жазатайым оқиғалардың туындау қаупін бағалау болып табылады.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу сипаттамалық құжаттық сипатта, 2024 жылдың қаңтар-желтоқсан айлары аралығында жүргізілді. Зерттеу объектісі өңдеу саласындағы пилоттық кәсіпорынның бес өндірістік цехының, оның ішінде ұсақтау-кептіру, сары фосфор алуда фосфорит агломератын өндіру, сары фосфор өндіру, фосфорды қайта түзу, бейтараптандыру мен жағу, азотты-оттегі өндірісінің 610 қызметкері болды.

Қатысушылар құжаттық іріктеу әдісімен таңдалды. Зардап шеккендердің санын анықтау үшін еңбекке уақытша жарамсыздық парақтары пайдаланылды, ал кәсіби тәуекелді бағалау барлық цехтар арасында жүргізілді. Сипаттамалық талдау үшін 2024 жылғы Н-1 жазатайым оқиға (”Еңбек қызметіне байланысты жазатайым оқиғаларды тергеп-тексеру материалдарын ресімдеу бойынша нысандарды бекіту туралы” Қазақстан Республикасы Денсаулық сақтау және әлеуметтік даму министрінің 2015 жылғы 28 желтоқсандағы № 1055 бұйрығы) және 7-ТПЗ нысандары бойынша «Еңбек қызметімен байланысты жарақаттану және кәсіптік аурулар туралы есеп» ресми статистикалық деректер қолданылды.

Нәтижелер және талқылаулар. Зерттеу пилоттық кәсіпорында жүргізілді. Жұмысшылардың жалпы саны 45 мамандық бойынша 1162 адамды құрады.

Зерттеулер пилоттық кәсіпорында толық 2024 жылдағы еңбекке жарамсыздық парақтары бойынша жүргізілді. Тұрмыстық жарақаттанудың 59 жағдайын қоса алғанда, 610 еңбекке жарамсыздық парақтары зерттелді.

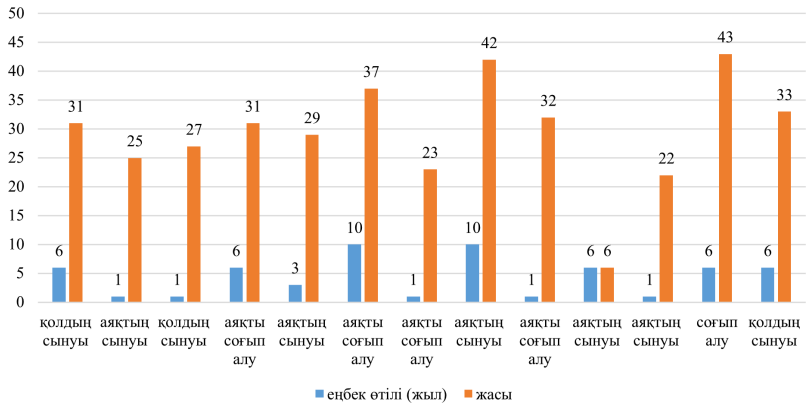
Ұсақтау-кептіру цехы шикізатты дайындауға (шикізатты қабылдау, қоймалау, ұсақтау, кептіру және сұрыптау), содан кейін оны пеш цехы мен агломерация цехының дестелеу бөлімшесіне жіберу үшін бағытталған.

Цехта негізгі технологиялық құрал-жабдықтар қолданылады, оларға денсаулыққа қауіпті шикізат көздерімен қатар жүретін роторлы стационарлық вагон аударғыш, ұсақтау-фрезерлеу машинасы, жылжымалы таспалы конвейер, бункер, бұрғылау ұнтақтау машинасы, желдету жүйесі, қиғаш таспалы конвейер, жылжымалы қалақшалы фидер, қап сүзгісі, диірмен желдеткіші, шлюз фидері, инерциялық көлбеу, конустық уатқыштар жатады.

Ұжымдық қорғау құралдарына КЦМП дымқыл шаң жинағыш, УГ-115 және УГ-230 типті электр сүзгілері, ротоклон скрубберлері жатады.

2022 жылы осы цехтың 1 қызметкері вагон аударғыш роторының роликті болттарын тарту және айлау жұмыстарын жүргізу кезінде зардап шекті, оған жұмыс өндірісін қажетті деңгейде ұйымдастырылмауы себеп болды.

Цехтың жалпы жұмысшылар саны-151 адам, 2024 жылы оның 13-і тұрмыстық жарақат алды.



1-сурет. «Ұсақтау-кептіру цехы» қызметкерлерінің жарақаттары: зақымдануды оқшаулау және жұмыс өтілі

Бұл 1-суретте кәсіби тәжірибе мен жас факторының жарақаттану сипатына әсерін жан-жақты бағалауға мүмкіндік беретін зақымдануды оқшаулау тұрғысынан жұмыс өтілі мен зардап шеккендердің жасына байланысты өндірістік жарақаттардың таралуы көрсетілген.

Жарақат алған жұмысшылардың жасы көбінесе 25 пен 43 жас аралығында болған, бұл еңбекке жарамды жасты көрсетеді. Зардап шеккендердің максималды жасы 42-43 жас, жұмысшылардың бұл санатында аяқтың жарақаты, көгеру мен қолдың сынуы көбірек кездеседі.

Еңбек өтілі бойынша жарақаттар (аяқтың сынуы және соғып алуы) жұмысшылардың барлық санаттарында тіркеледі, бұл жұмыс өтілі неғұрлым көп болса, жарақат түрі соғұрлым аз болады деген сенімді жоққа шығарады.

Егер қызметкерлердің кәсіптері бойынша жарақаттарды талдайтын болсақ, осы өндірістік цехта 29-31 жас аралығындағы электр жабдықтарын жөндеу және техникалық қызмет көрсетуші 3-6 жыл аралығында еңбек өтілі бар электромонтерлар қолдың сынуы жарақатын алған; 1-3 жыл жұмыс өтілі бар 22-31 жас аралығындағы мөлшерлеу аппаратшысы аяғын соғып алған; 25 және 32 жастағы электрдәнекерлеушілер аяқ сынуы және соғып алу жарақаттарын алғанын байқаймыз.

Осылайша деректерді талдау көрсеткендей, зерттеу жүргізілген цехта жұмыс өндірісін тиісті деңгейде ұйымдастырылмауы себепті биіктен құлау кезінде дененің жұмсақ тіндерінің көгеруі мен жарақаттануымен бір өндірістік және 13 тұрмыстық жарақат орын алды. Ең жиі кездесетін жарақат түрлері – аяқтың жоғары және төменгі бөліктерінің жарақаттануы (соғып алу, сыну). Зардап шеккендердің негізгі үлесі-25-43 жас аралығындағы жұмысшыларға тиесілі.

«Агломерация» цехында үш агломерация өндірісі желісі жұмыс істейді. Агломерация процесі фосфорит ұнтағын АКМ-7-312 агломерация машинасында 1623 К дейінгі температурада қатты отын ретінде ұсақталған коксты пайдаланып агломерациялауды қамтиды. Алынған агломерат салқындатылып, қажетті мөлшерге дейін ұсақталады және сұрыпталғаннан кейін пеш цехының дайындау бөліміне жіберіледі.

Цехта негізгі технологиялық жабдықтар, мысалы, науа таспалы конвейер, конвейерлік таразы, жылжымалы қайтымды таспалы конвейер, силос, электрлік дірілдейтін қоректендіруші, көлденең таспалы конвейер, үлестіргіш, көлбеу таспалы конвейер, бункер, өлшеу құрылғысы, қайтару үлестіргіш, барабанды араластырғыш, күйдіру машинасы, 26 вакуумдық камерасы бар газ коллекторы, шихта түйіршіктегіші, шаттлдық заряд таратушы, барабанды заряд беруші, диірмен желдеткіші, бір орамды ұсатқыш, қырғыш конвейері қолданылады.

Өндіріспен байланысты жазатайым оқиғалардан зардап шеккендерді қоса алғанда, кәсіптік тәуекелдерге ұшыраған адамдар (6 адам):

- түйіршіктегіш операторы (бейорганикалық шаң, фосфин, жұмыскердің қозғалыс кезінде құлауы, өндірістік жабдықтың үшкір бұрыштары бар элементтерінің әсеріне ұшырауы, жұмыскердің қозғалыс кезінде жабдықтың бетінде жоғары және төмен температуралардың әсеріне ұшырауы, электр тогының соғуы) (2023 жылғы жазатайым оқиға);

- қашықтан басқару операторы (бейорганикалық шаң, фосфин, шу) (2023 жылғы апат); - жөндеуші (жарықтың жеткіліксіздігі, шу, фосфин, бейорганикалық шаң, жұмысшының қозғалыс кезінде құлауы, өткір бұрыштары бар өндірістік жабдықтың құрылымдық элементтеріне әсер ету) (2023 жылы 2 апат);

- электр және газ дәнекерлеушісі (бейорганикалық шаң, шу, химиялық факторлар, өткір бұрыштары бар өндірістік жабдықтың құрылымдық элементтеріне әсер ету) (2023 жылғы апат);

- газды тазарту операторы (шу, химиялық факторлар, агломераттан шаңның шығарылуы, заряд, жабдықтың, механизмдердің, машиналардың қозғалатын және айналмалы бөліктеріне әсер ету) (2023 жылғы апат);

- ыстық агломератты ұсатқыш (шу, агломерат шаңының бөлінуі, шихта, фосфин, өткір бұрыштары бар өндірістік жабдықтың құрылымдық

элементтерінің әсері, өрт немесе жарылыс қаупі (үйкеліс немесе жоғары қысым).

Осы цехтың 6 жұмыскері 2021-2024 жылдары өндірістегі жазатайым оқиғалардан зардап шекті, олардың себептері жұмыс өндірісін қанағаттанарлықсыз ұйымдастыру, еңбек қауіпсіздігі және еңбекті қорғау ережелерін бұзу, жұмыс басшысы тарапынан бақылаудың әлсіреуі болды.

2021 және 2024 жылдар аралығында осы цехтағы 6 жұмыскер жұмыстың нашар ұйымдастырылуынан, еңбек қауіпсіздігі және еңбекті қорғау ережелерін бұзудан және жұмыс басшысының бақылауының әлсіреуінен туындаған жұмысқа байланысты жазатайым оқиғалардан зардап шекті.

1. ПТ-616 (16) диск беру құрылғысының позициясында +19,0 метрлік белгіде жұмыс істеу кезінде цехтың түйіршіктеу машинасының операторы науада тұрып қалған металды алып тастауға ниеттеніп, сол қолының 3-ші және 4-ші саусақтарының тырнақ фалангаларын жарақаттық ампутациядан алды.

Оқиға түрі: қозғалатын, ұшатын немесе айналатын заттар мен бөлшектердің соққысы. Оқиға себептері: жұмыскердің өрескел немқұрайлылығы;

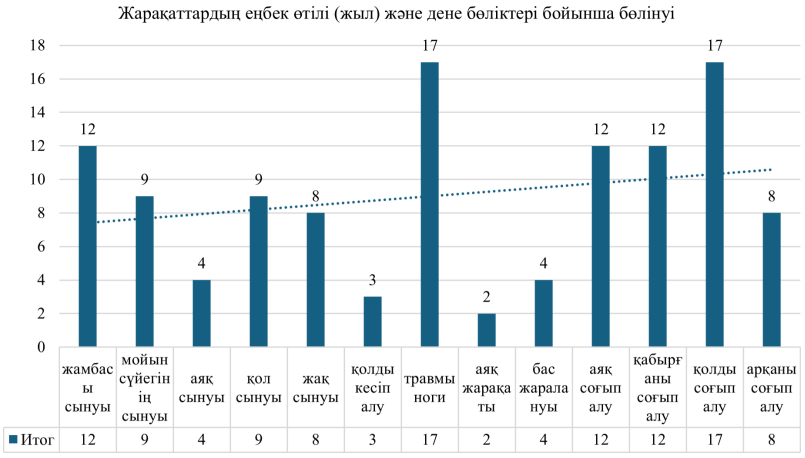
2. Цехтың қашықтан басқару пультінің операторы бетондау бөлімінің басқару пультіне бара жатып, шалбарын гипсокартон тіреуішіне қысып алып, құлады. Құлау салдарынан оң жақ тізе буынының жұмсақ тіндерінің жарақаты болды. Оқиға түрі жәбірленушінің құлауы болды. Оқиғаның себебі: жұмыс процедураларының дұрыс ұйымдастырылмауы;

3. ПТ-630 позициясында +0,0 м белгісінде таспалы конвейерге арналған резеңке тығыздағышты дайындау кезінде, 2-ші агломашинасының /күйдіру/ өткелінде, жөндеуші механик оң жақ санына пышақ жарақатын алды. Оқиғаның түрі-өткір затпен кесілген. Оқиғаның себебі жұмыскердің өрескел немқұрайлылығы және жұмыс басшысының бақылауының әлсіреуі болды.

4. Электр қозғалтқышы қосылған кезде SB-860/2 араластырғышындағы беріліс қорабының білігіндегі жұмсақ муфтаны ауыстыру кезінде электр газымен дәнекерлеуші мен жөндеуші әртүрлі жарақаттар алды. Оқиға қозғалатын, ұшатын немесе айналатын заттар мен бөлшектердің соққысынан болды. Оқиғаның себебі жұмыстың нашар ұйымдастырылуы болды.

Газ тазарту операторы жаяу жүргіншілер жолымен жүріп бара жатып сүрініп құлады. Құлау салдарынан ол бел-сегізкөз омыртқасынан жарақат алды. Апат құлау деп жіктелді. Апаттың себептері жұмысты нашар ұйымдастыру және еңбек қауіпсіздігі мен еңбекті қорғау ережелерін бұзу болды.

Цехтағы жұмысшылардың жалпы саны 356 адамды құрайды, оның ішінде 16 жұмысшы тұрмыстық жарақат алған.



2-сурет. «Сары фосфор алу үшін фосфат агломератын өндіру» цехындағы жұмыскерлер арасындағы жарақаттар: жарақаттардың орналасқан жері және жұмыс өтілі

Осы диаграмманы талдай отырып, цехта жұмыскерлердің көпшілігі аяқ пен қол жарақаттарын (сынуы, жарақат алу/ушиб/) алғанын атап өтуге болады. Мамандығы бойынша бөліп қарастырсақ, 4 жылдық тәжірибесі бар 31 жастағы салқындату операторының аяғы сынған; 8 жылдық тәжірибесі бар 29 жастағы электр газ дәнекерлеушісінің жағы сынған; 9 жылдық тәжірибесі бар 29 жастағы қашықтан басқару операторының қолы сынған; 4 жылдық тәжірибесі бар 29 жастағы конвейер операторының басы контузия алған; ал 8 және 12 жылдық тәжірибесі бар 37 жастағы газ тазарту операторларының жамбасы сынған және арқасынан жарақат алған.

Осылайша, деректерді талдау зерттеліп отырған цехта 5 жазатайым оқиға және 6 жарақат алған жұмысшы, сондай-ақ тұрмыстық жарақаттың 16 жағдайы анықталғанын көрсетті. Ең көп таралған жарақаттар жоғарғы және төменгі аяқ-қолдарда болды (көгерулер, сынықтар). Жарақат алған жұмысшылардың көпшілігі 29-37 жас аралығында болды.

Осылайша, деректерді талдау зерттелетін цехта 5 жазатайым оқиға мен 6 зардап шеккен жұмыскердің, сондай-ақ 16 тұрмыстық жарақаттың анықталғанын көрсетті. Ең жиі кездесетіні-жоғарғы және төменгі аяқтардағы жарақаттар (жарақат алуы, сынықтар). Зардап шеккендердің негізгі үлесі 29-37 жас аралығындағы жұмыскерлерге тиесілі.

«Сары фосфор өндіретін» цех сегіз шихталау станциясынан, сондай-ақ фосфор өндіретін төрт технологиялық желіден тұрады. Фосфор өндірісінің әрбір технологиялық желісіне фосфорлы электр пеші және пеш газын шаңнан және фосфор конденсациясынан тазартатын екі параллель жүйесі кіреді. Фосфор алудың барлық желілері РКЗ - 80Ф-И1 фосфор пештерімен және ЭВТ-2-5,5-20Ф-01 электр сүзгілерімен жабдықталған. Өндіріс әдісі-электротермиялық, руднотермиялық пештерде кремний диоксиді болған кезде фосфаттарды көміртегімен тотықсыздандыру.

Цехта көлбеу науалық таспалы конвейер, көлденең науалық кері айналмалы таспалы конвейер, кран-арқалық, пеш бункері, фосфор қабылдағышы, фосфор конденсаторы, ортадан тепкіш сорғы, секторлық ысырма, фосфор пеші, тік фосфорлы электр сүзгісі, суасты сорғысы, секторлық ысырма, сақтандырғыш гидроысырма сияқты негізгі технологиялық жабдықтар қолданылады.

Ұжымдық қорғаныс құралдарына ЦН-15 циклоны, ФРКДИ-1100 қап сүзгісі, СКЦН-34 циклоны және ФРКИ-360 қап сүзгілері кіреді. Барлығы 454 жұмысшы жұмылдырылды, оның 22-сі тұрмыстық жарақат алды.



3-сурет. Сары фосфор өндірісі цехындағы жұмысшылар арасындағы жарақаттар: жарақаттың орны және еңбек өтілі

Ұсынылған диаграмма зардап шеккендердің жасы мен еңбек өтілін ескере отырып, жарақат түрлері бойынша цех жұмысшылары арасындағы өндірістік жарақаттың құрылымын көрсетеді, бұл жарақаттардың сипатына кәсіби және демографиялық факторлардың әсерін бағалауға мүмкіндік береді.

Талдау көрсеткендей, сары фосфор цехындағы жарақаттар негізінен 26-49 жас аралығындағы жұмысшыларда тіркеледі, ал ең үлкен жас мәндері зардап шеккендердің жасы 45-49 жасқа жететін төменгі аяқтардың көгеруі мен дислокациясы сияқты зақымдануларға тән. Бұл өндірістік операцияларға белсенді қатысатын орта және жоғары еңбекке қабілетті жастағы жұмысшылар арасында жоғары тәуекел деңгейін көрсетеді.

Еңбек өтілі бойынша жарақаттар ең аз жұмыс тәжірибесі бар жұмысшыларда (2-4 жыл) және 20 жылға дейін немесе одан да көп жұмыс өтілі бар жұмысшыларда тіркеледі. Еңбек өтілі бойынша ең маңызды көрсеткіштер аяқтың шығуы мен сынуы, сондай-ақ қолдың кесілуі мен жарақаттануы кезінде тіркелді, бұл қауіпті өндірістік факторлардың ұзақ мерзімді әсерінің, сондай-ақ кәсіптік тәртіпке байланысты назар мен сақтық деңгейінің төмендеуін көрсетуі мүмкін.

Әсіресе, тірек-қимыл аппаратының зақымдануының - аяқтың, қабырғаның сынуы, сондай-ақ аяқтың шығуы мен көгеруі көп таралғанын атап өтуге болады. Бұл жұмыс орындарын ұйымдастыруға, өндірістік жабдықтың жай-күйіне, тауарлардың қозғалысына және цех ішіндегі қозғалыс қауіпсіздігіне байланысты ықтимал проблемаларды көрсетеді.

Тәжірибесі аз (2-4 жыл) жұмысшыларда қол жарақаттары мен аяқтың сынуы сияқты жарақаттардың салыстырмалы түрде аз үлесі басшылықтың қатаң бақылауымен және бейімделу кезеңінде еңбекті қорғау талаптарын сақтауға көбірек көңіл бөлумен байланысты, сонымен қатар тәжірибесі жеткіліксіз жұмысшылардың белгілі бір сақтығымен болуы мүмкін.

Жалпы, талдау нәтижелері цехтағы өндірістік жарақаттанудың жұмысшылардың жасына да, еңбек өтіліне де тәуелділігі бар деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді. Бұл мақсатты алдын алу шараларын енгізу, соның ішінде тәжірибелі жұмысшыларға қауіпсіз жұмыс әдістерін оқытуды күшейту, кәсіби тәуекелдерді үнемі бағалау, жұмыс орындарының эргономикасын жақсарту және еңбек қауіпсіздігі мәдениетін арттырудың қажеттілігін көрсетеді.

Осы цехтағы жұмысшылардың жарақаттарын кәсібі бойынша талдай отырып, 28-49 жас аралығындағы, 2-24 жыл жұмыс өтілі бар сары фосфор өндірісінің операторлары жарақаттанғанын, соның ішінде орнынан шығу, контузия, аяқтың сынуы және қабырғасының сынғанын атап өтуге болады.

Кәсіптік қауіп-қатерге ұшырағандар, соның ішінде өндірістегі жазатайым оқиғалардан зардап шеккендер (8 адам):

- слесарь-сантехник (бейорганикалық кварцит, кокс, фосфорит шаңы, шу, биіктіктен құлау, құлау, опырылу, жұмысшыға заттардың құлауы, өткір бұрыштары бар өндірістік жабдықтардың құрылымдық элементтерінің әсері, электр тогының соғуы) (2022 жылғы жазатайым оқиға);

- сары фосфор (түйіршіктеу) өндіру аппаратшысы (шу, фосфор оксиді, фосфин, ақ фосфор, биіктіктен құлау, қозғалу кезінде құлау, опырылу, жұмыскерге заттардың құлауы, ғимараттардың, құрылыстардың және олардың элементтерінің құлауы, қирауы, жабдықтың қозғалатын және айналатын бөліктерінің әсері, электр тогының соғуы) (жазатайым оқиға 2024 жылы);

- сары фосфор өндірісінің аппаратшысы (шихталаушы) (жарылыс, пеш газы, изотоптық датчиктер, жоғары температура Т 1400 ^{o}С) (2024 жылғы жазатайым оқиға);

- сары фосфор аппаратшысы (аға) (химиялық факторлар, өткір жиектер, қабыршақтар, құралсайманның кедір-бұдырлы беті, қозғалатын шикізат, материалдар, жоғары шаңдану және газдану, электр тогынан зақымдану) (2023 жылы және 2024 жылы жазатайым оқиға);

- электр жабдықтарына қызмет көрсету жөніндегі электр монтері (органикалық емес шаң,

электр тогымен зақымдану, өрт немесе жарылыс қаупі, биіктіктен құлау, құлау, ғимараттар мен олардың элементтерінің қирауы, жабдықтардың, механизмдердің, машиналардың қозғалатын және айналатын бөліктерінің әсері) (2024 жылғы жазатайым оқиға);

- сары фосфор өндірісінің аппаратшысы (ферроқорытпаларды ағызу бойынша) (шашыраулар, жоғары температура Т 1400 ^{o}С, электр тогымен зақымдану, көміртек тотығымен улану, өрт немесе жарылыс қаупі);

- сары фосфор (конденсация) өндірісінің аппаратшысы (шу, фосфор оксиді, электр тогымен зақымдану, өрт немесе жарылыс қаупі, жабдықтың, механизмдердің, машиналардың қозғалатын және айналатын бөліктерінің әсері, үшкір бұрыштары, жиектері, қабыршақтары және тегіс емес беттері бар өндірістік жабдық конструкциясы элементтерінің әсері, сондай-ақ жұмыскердің қозғалысы кезінде жабдық бетінің жоғары және төмен температурасының әсері) (жазатайым оқиға 2023 жылы);

- сары фосфор өндіру аппаратшысы (шаң-газ ұстайтын қондырғыларға қызмет көрсету бойынша) (шу, фосфин, ақ фосфор, үшкір бұрыштары, жиектері, қабыршақтары және тегіс емес беттері бар өндірістік жабдық конструкциясы элементтерінің әсері, сондай-ақ жұмыскердің қозғалысы кезінде жабдық бетінің жоғары және төмен температурасының әсері, жабдықтың, механизмдердің, машиналардың қозғалатын және айналатын бөліктерінің әсері, өрт немесе жарылыс қаупі).

2021-2024 жылдары өндірістегі жазатайым оқиғалардан осы цехтың 9 қызметкері зардап шекті, себептердің бірі - жұмыс өндірісінің қанағаттанарлықсыз ұйымдастырылуы болып табылады.

1. Осы цехтың сары фосфор өндіру аппаратшысы Батыс Қазақстан облысы Ақсай қаласының «Қазақстан» станциясында іссапарда болған кезде теміржол құрамының астына түсіп қалған. Диагноз: оң аяқтың тізе буыны деңгейінде травматикалық кесілуі. Оқиға түрі - темір жол көлігі оқиғасы. Оқиға себептері - қызметкердің өрескел абайсыздығы және жұмыс өндірісінің қанағаттанарлықсыз ұйымдастырылуы;

2. Слесарь-сантехник цехтың әкімшілік-тұрмыстық корпусының жертөлесіндегі кәріз құбырындағы ағып кетуді жою жұмыстарын жүргізген кезде қоқыстан құлады. Құлау салдарынан жабық бас сүйек жарақаты алған. Мидың соғылуы. Жедел субдуральды гематома, оң жақта. Оқиға түрі - зардап шегушінің құлауы. Оқиға себептері - қызметкердің өрескел абайсыздығы және жұмыс өндірісінің қанағаттанарлықсыз ұйымдастырылуы;

3. Сары фосфор өндірісінің (кәдеге жарату) аппаратшысы «Г» ауысымында 5-61-6 позицияда сорғы сальнигін толтыру кезінде конденсация бөлімшесінде жұмыс істегенде 0,8 м белгі көз қабығының жеңіл дәрежелі шамалы күйігін алды. Оқиға түрі - зиянды және қауіпті өндірістік факторлар мен заттардың әсері. Оқиға себептері - қызметкердің өрескел абайсыздығы және жұмыс өндірісінің қанағаттанарлықсыз ұйымдастырылуы;

4. Цехтың сары фосфор өндірісінің аға аппаратшысы «Г» ауысымында жұмыс істеп, № 6 пештің секторлық қақпағының 9 тиеу ағынының жанынан + 22,4 м белгісінде ессіз күйде табылды. Алғашқы медициналық көмек көрсетілгеннен кейін қалалық ауруханаға жеткізілді. Оқиға түрі-зиянды және қауіпті өндірістік факторлар мен заттардың әсері. Оқиға себептері-жұмыс өндірісінің қанағаттанарлықсыз ұйымдастырылуы;

5. Осы жұмыстарды жүргізу кезінде сары фосфор өндірісінің аппаратшысы НУВ-12, қызмет көрсету алаңының баспалдақының шетіне тайып түсіп, 16,4 метр белгі алаңына арқасымен құлады. Құлау нәтижесінде сары фосфор өндірісінің аппаратшысы оң жақтағы VI-VII қабырғаларының жабық сынығын алды. Оқиға түрі-зардап шегушінің құлауы. Оқиғаның себептері-зардап шегушінің өрескел абайсыздығы;

6. Цехтың пеш бөлімшесінде технологиялық жабдықты тексеру (аралау) барысында +43,0 метрлік белгісі бар баспалдақпен +40,0 метрлік белгімен түсіп, цехтың сары фосфор (шихталау-

шы) өндірісінің аппаратшысы құлады. Диагноз: сол жақ сан сүйегінің үлкен ұршығының жабық үзік сынығы. Оқиға түрі - зардап шегушінің құлауы. Оқиғаның себептері - зардап шегушінің өрескел абайсыздығы;

7. Цехтың сары фосфор өндіру аппаратшысы асханаға бара жатып, 2-түйіршіктеу бөлімінде оң аяқты +0,00 м белгісінде қайырып алады. Диагноз: Оң жіліншік буынының байламдарының созылуы. Оқиға түрі-зардап шегушінің құлауы. Оқиғаның себептері- зардап шегушінің өрескел абайсыздығы;

8. Цехтың пеш бөлімшесінде 7,8 метр белгідегі №6 пештің ферроледкасын жабу бойынша жұмыстарды жүргізу кезінде ферраның шашырауы сары фосфор (аға) өндіру аппаратшысының оң көзіне түсті. Диагноз: оң көздің конъюнктивасы мен қабығының термохимиялық күйігі. Оқиға түрі-зиянды және қауіпті өндірістік факторлар мен заттардың әсері. Оқиғаның себептері-жәбірленушінің өрескел абайсыздығы;

9. Электродты масса учаскесінің аға шебері. Диагноз: оң жақтағы өкше сүйегінің жабық сынуы. Оқиға түрі-әбірленушінің биіктіктен құлауы. Оқиғаның себептері-жәбірленушінің өрескел абайсыздығы;

10. Цехтың пеш бөлімшесінде +7,8 метр белгідегі №7 пештің пеш трансформаторларының камерасында трансформаторды тексеру жұмыстарын жүргізген кезде электр жабдықтарына қызмет көрсету жөніндегі электромонтер электр тогымен зақымданды. Жағдайлар, себептер және ауырлық дәрежесі анықталады. Алдын ала диагноз: дене бетінің 80% күйік. Оқиғаның түрі-электр тогының соғуы. Оқиғаның себептері-жәбірленушінің өрескел абайсыздығы;

Деректерді талдауды қорытындылай келе, зерттелетін цехта жұмыс өндірісінің қанағаттанарлықсыз ұйымдастырылуына және жәбірленушінің өрескел абайсыздығына, сондай-ақ тұрмыстық жарақаттардың 22 жағдайына байланысты өндірістік жарақаттанудың 9 жағдайы анықталғанын көрсетті. Ең жиі кездесетіні-жоғарғы және төменгі аяқтардағы жарақаттар (көгеру, сынықтар). Зардап шеккендердің негізгі үлесі 26-45 жас аралығындағы жұмысшыларға тиесілі.

«Сары фосфорды өңдеу» цехында тауарлық фосфорды алу тұндырғыштарда шикі фосфорды тұндыру, теміржол цистерналарында, контейнерлерде және бөшкелерде фосфорды жіберу, теміржол цистерналарын жуу әдісімен жүзеге асырылады. Сондай-ақ, техникалық фосфорды органикалық қоспалардан және мышьяк қоспаларынан тазарту жүргізіледі. Техникалық фосфорды тазарту дәрежесі тұтынушылардың талабы бойынша жасалады.

Бұл цехта тұндырғыш қоюландырғыш, буферлік сыйымдылық, бейтараптандырғыш, сары фосфор тұндырғышы, батырмалы сорғы, ауа үрлегіш, вакуумдық сорғы, инверторлы дәнекерлеу аппараты, ФТН 1253К центрифуга сияқты негізгі технологиялық жабдықтар қолданылады.

Ұжымдық қорғау құралдарының ішінде: циклондық қондырғы, ГПФ7-9 электр сүзгілері, циклофильтр.

Өндіріске байланысты жазатайым оқиғалардан зардап шеккендерді қоса алғанда, кәсіби тәуекелдерге ұшырағандар (3 адам):

- сары фосфор өндірісінің аппаратшысы (айналмалы және қозғалмалы механизмдердің, қысыммен жұмыс істейтін аппаратуралардың, фосфордың, фосшламның, сутегі фторидінің, фосфиннің уытты әсерінің болуы) (2021, 2022 және 2023 жылдардағы 3 жазатайым оқиға);

- электр жабдықтарын жөндеу және техникалық қызмет көрсету жөніндегі электромонтер (айналмалы және қозғалмалы механизмдердің болуы, биіктіктен құлау, фосфиннің, ақ фосфордың уытты әсері, электр тогының соғуы, өрт немесе жарылыс қаупі) (2023 жылғы жазатайым оқиға);

- ілмектеуші (биіктіктен құлау, кальцийленген соданың бейорганикалық тозаңы, электр тогының зақымдануы, өрт немесе жарылыс қаупі, жабдықтардың, механизмдердің, машиналардың қозғалатын және айналатын бөліктерінің әсері) (2023 жылғы жазатайым оқиға).

2021-2024 жылдары аталған цехтың 5 қызметкері өндірістегі жазатайым оқиғалардан зардап

шекті, олардың себептері жұмыс өндірісінің қанағаттанарлықсыз ұйымдастырылуы, жеке қорғану құралдарын қолданбаудан болды.

1. Аталған цехтың сары фосфорды өндіру аппаратшысын Е-1670/2 позициясының сыйымдылығынан Ду = 25 мм резеңке жеңін шығару кезінде құрамында фосфоры бар ағындар шашыраған. Диагноз: Екі аяқ-қолдың әртүрлі дәрежедегі фосфор шламымен термохимиялық күйік. Оқиға түрі - зиянды өндірістік факторлардың әсері. Оқиға себептері - жұмыс өндірісін қанағаттанарлықсыз ұйымдастыру және жеке қорғану құралдарын қолданбау.

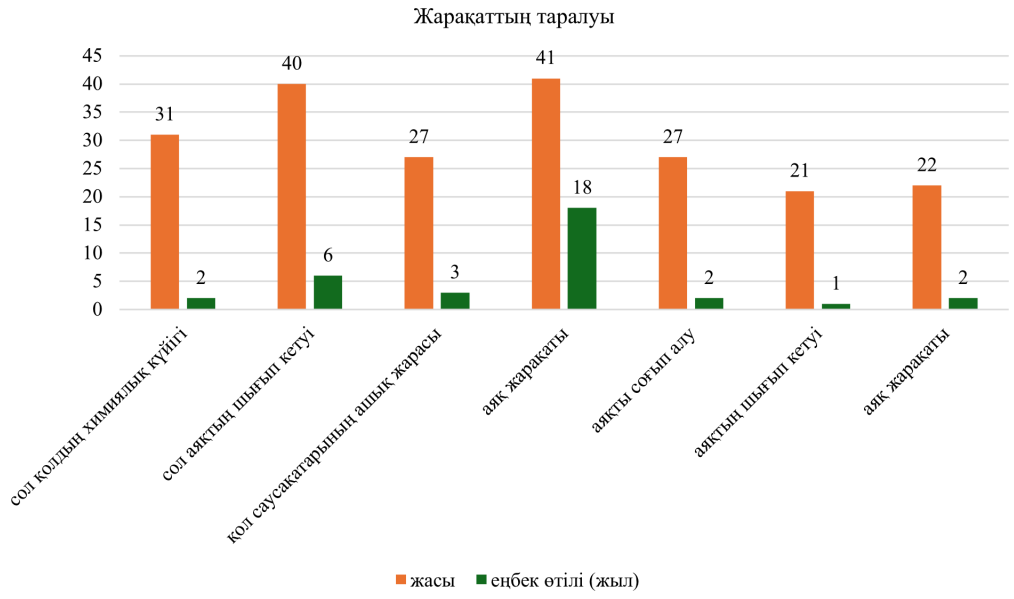
2. П-6 тазартылған фосфор позасының қабылдағышында өлшеуішпен фосфорды өлшеу кезінде цехтың сары фосфор өндірісінің аппаратшысы фосфор II-IIIA буымен бет, мойын және екі білек, денесінде S~ 4% термохимиялық күйік алды. Оқиғаның түрі-зиянды өндірістік факторлардың әсері. Оқиғаның себептері - жұмыс өндірісін қанағаттанарлықсыз ұйымдастыру және жеке қорғаныс құралдарын қолданбау;

3. Цехтың электр жабдықтарын жөндеу және қызмет көрсету жөніндегі электр монтері 1309/4А позициясының сорғысын жинау кезінде сол қолының саусақтарынан күйік алған. Оқиға түрі - зиянды өндірістік факторлардың әсері. Оқиға себептері - жұмыс өндірісін қанағаттанарлықсыз ұйымдастыру және жеке қорғану құралдарын қолданбау;

4. Е 1331/2 позициясының қоймасынан Е 1/8 позициясының монжусына техникалық сары фосфорды қабылдау жөніндегі жұмыстарды жүргізу кезінде сары фосфор өндірісінің аппаратшысы фосфорды сумен лақтырды. Лақтыру кезінде сары фосфор өндірісінің аппаратшысы қызмет көрсету алаңынан 0,0 метр шамасында 5,8 метр шамасында секірді. Биіктіктен құлау нәтижесінде зардап шегуші сол жақ жамбастың жабық сынықтарын алды. Екі санның, кеуде қуысының, сол қолдың термиялық, химиялық күйігі 10 % /1-2-3 кезең. Оқиға түрі - зиянды өндірістік факторлардың әсері. Оқиға себептері - жұмыс өндірісін қанағаттанарлықсыз ұйымдастыру және жеке қорғану құралдарын қолданбау;

5. Сары фосфор қоймасының аумағында осы цехтың ілмектеуші дененің әртүрлі бөліктерінде химиялық күйік алды. Оқиғаның түрі – химиялық күйік. Оқиғаның себептері – жұмыс өндірісін қанағаттанарлықсыз ұйымдастыру.

Цехтағы жұмысшылардың жалпы саны 145 адамды құрайды, оның ішінде 7 жұмысшы тұрмыстық жарақат алған.



4-сурет. «Фосфорды өңдеу, бейтараптандыру және жағу» цехындағы жұмыскерлер арасындағы жарақаттар: зақымдануды оқшаулау және жұмыс өтілі

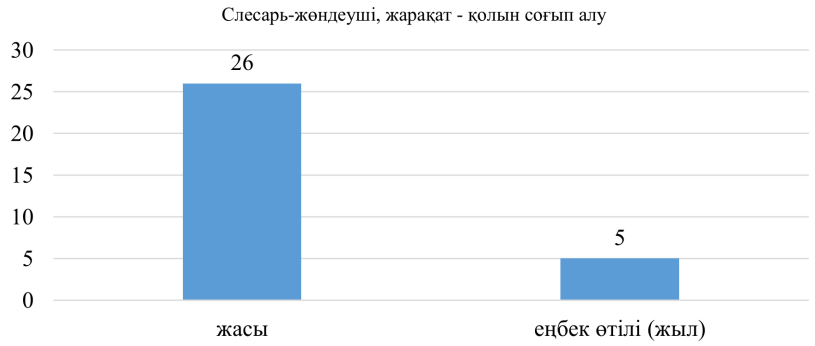
Осы диаграммаларды талдай отырып, цехтағы жұмысшылардың көбісінде қолдары мен аяқтарына жарақат алған (сыну, ұрып алу) байқауға болады. Егер 41 мен 27 жастағы слесарь-жөндеуші мамандығы бойынша егжей-тегжейлі айтсақ, еңбек өтілі 18 жыл және 3 жыл аяқ-қолдары жарақат алған. Ал 21 жастағы электр газбен дәнекерлеуші, еңбек өтілі 1 жыл ғана аяқтары сынған, электр жабдықтарын жөндеу және қызмет көрсету жөніндегі электромонтер - еңбек қызметі нәтижесінде 2 жыл өтілі бар 22 жастағы жұмыскер аяғынан жарақат алған болса, 31 жастағы еңбек өтілі 2 жыл ілмектеуші сол қолының химиялық күйігін алды.

Деректерді талдау негізінде зерттелетін цехта өндірістік жарақаттанудың 5 жазатайым оқиғасы және тұрмыстық жарақаттардың 7 жағдайы анықталғанын көрсетті. Ең жиі кездесетіні жарақаттардың түрі-аяқ-қолдардың жарақаттары (ұрып алу, соғып алу, сынуы, орынынан шығып кетуі). Зардап шеккендердің негізгі үлесі 21-27 жас аралығындағы жұмысшыларға тиесілі.

«Азот-оттегі өндірісі» цехында сары фосфор өндірісінің технологиялық сызбасының құрамына кіреді және азот газын, сығылған құрғатылған және кептірілмеген ауаны, техникалық оттегі газын өндіруге және зауытқа беруге қызмет етеді. Сұйық азот пен сұйық техникалық оттегін жағына жібереді. «Азот-оттегі өндірісі» ауаны төмен температурада ректификациялау әдісімен жүзеге асырылады.

Технологиялық сызба төмен қысымды цикл бойынша ауаны кешенді тазарту (АКТ) блогын, турбодетандерлік агрегатты (ДТГ411) қолдана отырып, ағызу ағынында газ үрлегішпен салынған. Негізгі бөлу аппараты бір реттік ректификация сызбасы бойынша салынған.

Бұл цехта ауаны бөлу блогы, АКТ-30 сұйытылған газ сорғысы, «К-500» орталық тепкіш компрессор, «ДТГ-14/0,3» турбодетандер, ауаны кептіру блогы, ауа компрессоры сияқты негізгі технологиялық жабдықтар қолданылады.



5-сурет. «Азот-оттегі өндіріс» цехының слесарь-жөндеушісінің қолын соғып алу: зақымдануды оқшаулау және жұмыс өтілі

Өндіріске байланысты кәсіптік тәуекелдерге ұшырағандар (3 адам):

- ауа бөлу аппаратшысы (шу, биіктіктен құлау, қозғалу кезінде құлау, заттардың құлауы, құлау, жабдықтың, механизмдердің, мәшиналардың қозғалатын және айналатын бөліктерінің әсері, электр тоғының соғуы, өрт немесе жарылыс қаупі);

- газды кептіру аппаратшысы (шу, биіктіктен құлау, қозғалу кезінде құлау, заттардың құлауы, құлау, жабдықтың, механизмдердің, мәшиналардың қозғалатын және айналатын бөліктерінің әсері, электр тоғының соғуы, өрт немесе жарылыс қаупі);

- баллондарды толтырғыш (шу, химиялық факторлар, қысымдағы ыдыстар, биіктіктен құлау, қозғалу кезінде құлау, заттардың құлауы, құлау, жабдықтың, механизмдердің, мәшиналардың қозғалатын және айналатын бөліктерінің әсері, электр тоғының соғуы, өрт немесе жарылыс қаупі).

2021-2024 жылдары бұл цехта жазатайым оқиғалар тіркелген жоқ. Жалпы саны 56 жұмыскер, оның ішінде 1 жұмыскер тұрмыстық жарақат алды.

Слесарь-жөндеуші, 26 жас, 5 жыл еңбек өтілі, қолын соғып алу.

Осы цех бойынша соңғы 2020-2025 жылдарда өндірістік жарақаттану анықталған жоқ, бірақ тұрмыстық жарақаттың бір жағдайы орын алды. Осы кәсіпорында 5 жылдық жұмыс өтілі бар 26 жастағы жұмыскер (слесарь-жөндеуші).

Қорытынды. 2024 жылғы жалпыланған деректер фосфор өнеркәсібі кәсіпорындарында жарақаттанудың 65 жағдайы тіркелгенін көрсетеді, оның 6-ы өндірістік, 59-ы тұрмыстық. Өндірістік жарақаттану көрсеткіштері жазатайым оқиғаларды есепке алу мен тіркеудің толық болмауына байланысты саладағы қауіпсіздік жағдайы мен тәуекелдерді басқару деңгейінің дұрыс бағалануын қамтамасыз етпейді. Тіркелген өндірістік жарақаттардың төмен деңгейі кәсіптік тәуекелдерді объективті бағалау мүмкіндіктерін шектейді және еңбекті қорғауды басқарудың тиімділігін төмендетеді. Алынған деректер еңбек қауіпсіздігін нормативтік-құқықтық және ұйымдастырушылық қамтамасыз етуді жетілдіру және кәсіптік тәуекелдерді басқаруға тәуекел-тәсілді енгізу қажеттілігін негіздейді.

Қаржыландыру. Мақалада «Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институты» ШЖҚ РМК-ның ғылыми - зерттеу жұмыстарын бағдарламалық - нысаналы қаржыландыру шеңберінде «Еңбек жағдайлары және кәсіптік тәуекелдер: «жасыл экономикаға» көшу шеңберінде топтастырудың жіктелуі, санаттары мен өлшемшарттары»» (ЖТН BR 22182667) тақырып бойынша ғылыми-техникалық бағдарламаны іске асыру барысында алынған ғылыми зерттеулердің нәтижелері ұсынылған.

Әдебиеттер

1. Қазақстан Республикасының Еңбек Кодексі.2015 жылғы 23 қарашадағы №414-V ҚРЗ.1 қаулы, 61 тармақша. Электрондық ресурс. -URL:adilet.zan.kz/rus/docs/K1500000414. https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z1400000243.-*Қаралған* күні: 25.12.2025.

2. Шаяхметова, Л., Курманов, А., & Айтимова, Ш. (2024). Совершенствование охраны труда в Республике Казахстан: оценка профессиональных рисков и стратегии страхования от несчастных случаев на производстве// Bulletin the National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan.-Vol.5(411).-P.401-418.DOI 10.32014/2024.2518-1467.849.

3. Afidah A., Khamisah Awang L., Helmy S., Syed Sharizman Syed A., Fredie R., Mohd Rohaizat H. Prevalence of occupational injury and determination of safety climate in small scale manufacturing industry: A cross-sectional study //Annals of Medicine & Surgery. - 2021.-Vol.69: 102699. DOI 10.1016/j.amsu.2021.102699.

4. Ердесов Н.Ж., Сраубаев Е.Н., Серик Б. Производственный травматизм и профессиональная заболеваемость в Республике Казахстан //Экология и медицина.2020. - № 4. - С.38- 45.

5. Ghahramani A., Amirbahmani A. A Study of the Causes of Occupational Accidents in Manufacturing Companies//Archives of Trauma Research.-2021.-Vol.10(2):64.DOI 10.4103/atr.atr_56_20.

6. ВОЗ оценивает стоимость выполнения глобальных задач, связанных со здоровьем, к 2030 г. URL: https://www.who.int/ru/news/item/17-07-2017-who-estimates-cost-of-reaching-global-health-targets-by-2030.- Қаралған күні: 25.12.2025.

7. Еңбек қауіпсіздігі мен гигиенасына жәрдемдесетін негіздер туралы конвенцияны (187-конвенция) ратификациялау туралы Қазақстан Республикасының Заңы 2014 жылғы 20 қазандағы № 243-V ҚРЗ. -URL: https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z1400000243.- Қаралған күні: күні: 25.12.2025.

8. Қазақстан Республикасының 2024-2030 жылдарға арналған қауіпсіз еңбек тұжырымдамасын бекіту туралы Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2023 жылғы 26 желтоқсандағы № 1182 қаулысы. -URL:adilet.zan.kz/rus/docs/P2200000245. Қаралған күні: күні: 25.12.2025.

9. Rosa Maria P., Angel Tejada P., Maria Pilar S.//How to prevent 3 million deaths worldwide: a systematic review of occupational accident research factors and cost-based approach. //EUPHA. -2025.-Vol.35(1).-P.91-100. DOI 10.1093/eurpub/ckae197.

10. Bravo G., Viviani C., Lavallière M., Arezes P., et.all. Do older workers suffer more workplace injuries? A systematic review.// International Journal of Occupational Safety and Ergonomics.- 2022. -Vol.28(1). -P.398- 427.DOI 10.1080/10803548.2020.1763609.

11. Бакирова А.Б., Карамова Л.М., Каримова Л.К., Власова Н.В., Шаповал И.В., Башарова Р.Г. Современные проблемы производственного травматизма со смертельным исходом. // Гигиены труда. - 2024. -Т.1. -С.25-48. DOI 10.24412/2411-3794-2024-10102.

12. Жеглова А.В., Яцына И.В., Гаврильченко Д.С. Корпоративные программы сохранения здоровья-основной элемент системы здоровьесбережения работающего населения // Здравоохранение Российской Федерации. -2022. -Т.66(5). -С.385-389. DOI 10.47470/0044-197X-2022-66-5-385-389.

13. 2024 жылғы Қазақстан Республикасындағы еңбек қызметіне байланысты жарақаттану және кәсіптік аурулар туралы//Ұлттық статистика бюросының анықтамалығы. -2025. -URL:stat.gov.kz/ru/news/o-travmatizme-svyazannom-s-trudovoy-deyatelnostyu/?sphrase_id=1588311. -Қаралған күні: күні: 28.12.2025.

References

1. Қazaқstan Respublikasynyң Eңbek Kodeksi.2015 zhylғy 23 қarashadaғy №414-V ҚRZ.1 қauly, 61 tarmaқsha. Jelektrondyқ resurs. -URL:adilet.zan.kz/rus/docs/K1500000414. https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z1400000243.-Қaralғan kүni: 25.12.2025. [in Kazakh]

2. Shajahmetova, L., Kurmanov, A., & Ajtimova, Sh. (2024). Sovershenstvovanie ohrany truda v Respublike Kazahstan: ocenka professional’ nyh riskov i strategii strahovanija ot neschastnyh sluchaev na proizvodstve// Bulletin the National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. - Vol.5(411). -P.401-418.DOI 10.32014/2024.2518-1467.849. [in Russian]

3. Afidah A., Khamisah Awang L., Helmy S., Syed Sharizman Syed A., Fredie R., Mohd Rohaizat H. Prevalence of occupational injury and determination of safety climate in small scale manufacturing industry: A cross-sectional study //Annals of Medicine & Surgery. - 2021.-Vol.69: 102699. DOI 10.1016/j.amsu.2021.102699.

4. Erdesov N.Zh., Sraubaev E.N., Cerik B. Proizvodstvennyj travmatizm i professional’ naja zabolevaemost’ v Respublike Kazahstan //Jekologija i medicina.2020. - № 4. - S.38- 45. [in Russian]

5. Ghahramani A.,Amirbahmani A. A Study of the Causes of Occupational Accidents in Manufacturing Companies//Archives of Trauma Research.-2021.-Vol.10(2):64.DOI 10.4103/atr.atr_56_20.

6. VOZ ocenivaet stoimost’ vypolnenija global’ nyh zadach, svjazannyh so zdorov’ em, k 2030 g. URL: https://www.who.int/ru/news/item/17-07-2017-who-estimates-cost-of-reaching-global-health-targets-by-2030.- Қaralғan kүni: 25.12.2025. [in Russian]

7. Eңbek қauipsizdigi men gigienasyna zhәrdemdesetin negizder turaly konvencijany (187-konvencija) ratifikacijalau turaly Қazaқstan Respublikasynyң Zaңy 2014 zhylғy 20 қazandaғy № 243-V ҚRZ. -URL: https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z1400000243.- Қaralғan kүni: kүni: 25.12.2025. [in Kazakh]

8. Қazaқstan Respublikasynyң 2024-2030 zhyldarға arnalғan қauipsiz eңbek tұzhyrymdamasyn bekitu

turaly Қazaқstan Respublikasy Ykimetinің 2023 zhylғy 26 zheltoқsandaғy № 1182 қaulysy. - URL:adilet.zan.kz/rus/docs/P2200000245. Қaralғan kүni: kүni: 25.12.2025. [in Kazakh]

9. Rosa Maria P., Angel Tejada P., Maria Pilar S.//How to prevent 3 million deaths worldwide: a systematic review of occupational accident research factors and cost-based approach. //EUPHA. -2025.-Vol.35(1).-P.91-100. DOI 10.1093/eurpub/ckae197.

10. Bravo G., Viviani C., Lavallière M., Arezes P., et.all. Do older workers suffer more workplace injuries? A systematic review.// International Journal of Occupational Safety and Ergonomics.- 2022. -Vol.28(1). -P.398- 427.DOI 10.1080/10803548.2020.1763609.

11. Bakirova A.B., Karamova L.M., Karimova L.K., Vlasova N.V., Shapoval I.V., Basharova R.G. Sovremennye problemy proizvodstvennogo travmatizma so smertel' nym ishodom. // Gigieny truda. -2024. -T.1. -S.25-48. DOI 10.24412/2411-3794-2024-10102. [in Russian]

12. Zheglova A.V., Jacyna I.V., Gavril' chenko D.S. Korporativnye programmy sohranenija zdorov' ja-osnovnoj jelement sistemy zdorov' esberezhenija rabotajushhego naselenija // Zdravoohranenie Rossijskoj Federacii. -2022. -T.66(5). -S.385-389. DOI 10.47470/0044-197X-2022-66-5-385-389. [in Russian]

13. 2024 zhylғy Қazaқstan Respublikasyndaғy eңbek қyzmetine bajlanysty zharaқattanu zhәne kәsiptik aurular turaly//Ұlttyқ statistika bjurosynyң anyқtamalyғy. -2025. -URL:stat.gov.kz/ru/news/o-travmatizme-svyazannom-s-trudovoy-deyatelnostyu/? sphrase_id=1588311. - Қaralғan kүni: kүni: 28.12.2025. [in Kazakh]

Авторлар туралы мәлімет

Актаева Л.М.- медицина ғылымдарының докторы, Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институтының Бас директоры, Астана, Қазақстан e-mail:rniiot@rniiot.kz;

Бекмағамбетов Ә.Б.- заң ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессорі (доцент), Еңбекті қорғау жөніндегі республикалық ғылыми-зерттеу институтының Бас директорының орынбасары, Кравцова көшесі 18, Астана e-mail:adilet1979@mail.ru;

Рахметова А.М. - медицина ғылымдарының кандидаты, доцент, ғылыми зерттеулер орталығының бөлім басшысының орынбасары, Астана Қазақстан, e-mail: ra_anar@mail.ru;

Насырова Г.А.- экономика ғылымдарының докторы, ғылыми зерттеулер орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Астана Қазақстан, e-mail: gnassyrova@yandex.kz;

Құлмағамбетова Э.А.- химия ғылымдарының кандидаты, ғылыми зерттеулер орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Астана, Қазақстан, e-mail: elya_kulmagambet@mail.ru;

Алшынбекова Г. Қ.- биология ғылымдарының кандидаты, ғылыми зерттеулер орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Астана Қазақстан, e-mail: gulnaz_gak@mail.ru;

Шилменова А.Т. - экономика ғылымдарының магистрі, ғылыми зерттеулер орталығының жетекші ғылыми қызметкері, , Астана, Қазақстан, e-mail: aigul.shilmenova@gmail.com;

Сағындықова Н. Т.- техника және технология ғылымдарының магистрі, ғылыми зерттеулер орталығының аға ғылыми қызметкері, Астана, Қазақстан, e-mail: nursag79@mail.ru.

Сведения об авторах

Актаева Л.М.- доктор медицинских наук, Генеральный директор Республиканского научно-исследовательского института по охране труда, г. Астана, Казахстан, e-mail: e-mail:rniiot@rniiot.kz;

Бекмагамбетов А.Б.-кандидат юридичесских наук, ассоциированный профессор (доцент) заместитель генерального директора Республиканского научно-исследовательского института по охране труда, Астана, Казахстан, e-mail: e-mail:adilet1979@mail.ru;

Рахметова А.М.- кандидат медицинских наук, доцент, заместитель руководителя отдела центра научных исследований, г. Астана, Казахстан, e-mail: ra_anar@mail.ru;

Насырова Г.А. - доктор экономических наук, руководитель отдела стратегического развития и международного со-

трудничества, Астана, Казахстан, e-mail: gnassyrova@yandex.kz;

Кульмагамбетова Э.А.- кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник центра научных исследований, Астана, Казахстан, e-mail: elya_kulmagambet@mail.ru;

Алшынбекова Г.К-кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник центра научных исследований, г. Астана, Казахстан, e-mail: gulnaz_gak@mail.ru;

Шилменова А.Т.- магистр экономических наук, старший научный сотрудник центра научных исследований, ул. Кравцова 18, г. Астана, Казахстан, e-mail: aigul.shilmenova@gmail.com;

Сагиндикова Н.Т.-магистр техники и технологии, старший научный сотрудник центра научных исследований, ул. Кравцова 18, г. Астана, Казахстан, 010000, e-mail: nursag79@mail.ru.

ҒТАМР 52.47.27 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1432**

ҚАБАТТЫ ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ЖАРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ ЖӘНЕ ОНЫ ТҮРЛЕНДІРУ

[1]М.Д. Бисенгалиев, [1]Р.Т. Сулейменова, [2]Мухаммад Насир, [1]Г.Ш. Досказиева, [1]Ж.К. Зайдемова, [1]О.Ш. Тулегенова, [1]Ж.Б. Шаяхметова, [1]А.С. Каримов

[1]С.Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті, Атырау, Қазахстан,
[2]Химия ғылымдары мектебі Малайзия зерттеу университеті, Пинанг, Малайзия

Корреспондент-автор: maks_bisengali@mail.ru

Бұл мақалада мұнай ұңғымаларының өнімділігін арттырудың негізгі әдістерінің бірі ретінде, әсіресе төмен өткізгіш коллекторларды игеру кезінде қабатты гидравликалық жару (ҚГЖ) қолданудың теориялық және практикалық негіздері қарастырылған. Қабаттың сүзу-сыйымдылық қасиеттерін сенімді анықтау қажеттілігіне басты назар аударылады, өйткені дәл осы сипаттамалар ҚГЖ жүргізудің сәттілігін және оны қолданудың экономикалық орындылығын анықтайды. Юра коллекторларының құрылымы мен қасиеттерін, сондай – ақ өнімділіктің төмендеуінің негізгі себептерін, соның ішінде колматация мен қабатпен гидродинамикалық байланыстың нашарлауын ескеретін «ұңғыма – кенжар маңы аймағы – қабат» жүйесінің сүзу моделі салынды.

Талдаудың негізінде айдау және өндіру ұңғымаларында ҚГЖ жүргізудің нәтижелері аудандық игеру жүйелерінде өндірудің өсуі мұнайдың тұтқырлығы мен айдалатын судың арақатынасына байланысты екендігі анықталды. Ең үлкен әсерге ҚГЖ-ды біріктіретін және жақын маңдағы ұңғымалардың кенжар маңындағы аймақтарын өңдейтін кешенді әсер ету арқылы қол жеткізілетіні ерекше атап өтіледі. Бұл тәсіл қабатқа біркелкі әсер етеді, дренаж аймағын қамтуды арттырады және өндірістің жоғары деңгейін ұзақ уақыт сақтауға ықпал етеді.

Жасалған тұжырымдар кен орнының геологиялық-техникалық параметрлерін егжей-тегжейлі талдауға негізделген өндіруді қарқындату жөніндегі іс-шараларды кешенді жоспарлау қажеттілігін растайды.

Түйін сөздер: гидравликалық қабаттың жарылуы, ұңғымалардың өнімділігі, мұнай өндіруді арттыру, өндіруді қарқындату, кенжар маңы аймағы, сүзу-сыйымдылық қасиеттері, кен орындарын игеруді оңтайландыру.

ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ

[1]М.Д. Бисенгалиев, [1]Р.Т. Сулейменова, [2]Мухаммад Насир, [1]Г.Ш. Досказиева, [1]Ж.К. Зайдемова, [1]О.Ш. Тулегенова, [1]Ж.Б. Шаяхметова, [1]А.С. Каримова,

[1]Атырауский университет нефти и газа им. Сафи Утебаева, Атырау, Казахстан,
[2]Школа химических наук Исследовательского Университета Малайзии, Пинанг, Малайзия,
e-mail: maks_bisengali@mail.ru

В статье рассмотрены теоретические и практические основы применения гидравлического разрыва пласта (ГРП) как одного из ключевых методов повышения продуктивности нефтяных скважин, в особенности при разработке низкопроницаемых коллекторов. Основное внимание уделено необходимости достоверного определения фильтрационно-ёмкостных свойств пласта, поскольку именно эти характеристики во многом определяют успешность проведения ГРП и экономическую целесообразность его применения. Построена фильтрационная модель системы «скважина – призабойная зона – пласт», учитывающая строение и свойства юрских коллекторов, а также основные причины снижения продуктивности, включая кольматацию и ухудшение гидродинамической связи с пластом.

На основе анализа результаты проведения ГРП в нагнетательных и добывающих скважинах при площадных системах разработки установлено, что прирост добычи зависит от соотношения вязкостей нефти и закачиваемой воды. Особо подчёркивается, что наибольший эффект достигается при комплексном воздействии, совмещающем ГРП и обработки призабойных зон близлежащих скважин. Такой подход обеспечивает более равномерное воздействие на пласт, увеличивает охват зоны дренирования и способствует длительному поддержанию повышенного уровня добычи.

Сделанные выводы подтверждают необходимость комплексного планирования мероприятий по интенсификации добычи, основанного на детальном анализе геолого-технических параметров месторождения.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, продуктивность скважин, повышение нефтеотдачи, интенсификация добычи, призабойная зона, фильтрационно-емкостные свойства, оптимизация разработки месторождений.

APPLICATIONS OF HYDRAULIC FRACTURING TECHNOLOGIES AND THEIR MODIFICATIONS

[1]M.D. Bissengaliyev✉, [1]R.T. Suleimenova, [2]M. Nasir, [1]G.Sh. Doskazieva, [1]Zh.R. Zaidemova, [1]O.Sh. Tulegenova, [1]Zh.B. Shayakhmetova, [1]A.S. Karimova

[1]S. Utebaev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan,
[2]School of Chemical Sciences, Universiti Sains, Penang, Malaysia,
e-mail: maks_bisengali@mail.ru

The article discusses the theoretical and practical foundations of hydraulic fracturing (HF) as one of the key methods for increasing the productivity of oil wells, especially when developing low-permeability reservoirs. The main focus is on the need for reliable determination of the filtration and storage properties of the formation, since these characteristics largely determine the success of hydraulic fracturing and the economic feasibility of its application. A filtration model of the ‘well – bottomhole zone - formation’ system has been constructed, taking into account the structure and properties of Jurassic reservoirs, as well as the main reasons for productivity decline, including clogging and deterioration of hydrodynamic communication with the formation.

Based on the analysis of the results of hydraulic fracturing in injection and production wells in area development systems, it has been established that the increase in production depends on the ratio of the viscosities of oil and injected water. It is particularly emphasized that the greatest effect is achieved through a comprehensive approach combining hydraulic fracturing and treatment of the bottomhole zones of nearby wells. This approach ensures a more uniform impact on the formation, increases the coverage of the drainage zone and contributes to the long-term maintenance of increased production levels.

The conclusions confirm the need for comprehensive planning of measures to intensify production based on a detailed analysis of the geological and technical parameters of the field.

Keywords: hydraulic fracturing, well productivity, oil recovery enhancement, production intensification, bottomhole zone, filtration and storage properties, field development optimisation.

Кіріспе. Қабатты гидравликалық жару мұнай мен газ конденсатын өндірудің ағымдағы деңгейін, айдау ұңғымаларының қабылдау қабілетін арттыру әдістерінің бірі болып табылады, бұл төмен өткізгіштігі бар тығыз жыныстарда (құмтастар, әктастар, доломиттер және т.б.) терең жатқан горизонттарды сынауға мүмкіндік береді. Оның мәні сұйықтықты жоғары қысыммен айдау кезінде (таудан жоғары) табиғи заттардың ашылуы және өнімді қабатта жасанды жарықтар пайда болады. Жарықтар артық қысымды алып тастағаннан кейін олардың жабылуына жол бермейтін бекітетін агенттерді енгізу арқылы бекітіледі.

Заманауи технология терең енетін қабатты гидравликалық жару (ТҚГЖ) қабатқа әсер ету

аймағын едәуір ұлғайтуды, соның ішінде іргелес ұңғымалар арасындағы жарықтар жүйесін қосуды қарастырады.

Соңғы жылдары жыртылу нұсқалары кең таралуда: қышқыл, көбік, сілтілер мен мұнай негізіндегі ерітінділерді қолдану.

Қабатты гидравликалық жару (ҚГЖ) төмен өткізгіш, нашар ағызылатын коллекторларды ашатын ұңғымалардың өнімділігін арттырудың ең тиімді әдістерінің бірі болып табылады.

Қабатты гидравликалық жару -сұйықтықты жоғары қысыммен айдау арқылы өнімді қабатта жарықтар жасау, содан кейін оларды пропантпен бекіту. Бұл төмен өткізгіш коллекторларды, сондай-ақ үлкен радиусты қабаттың ластанған кенжар аймақтарын дамытудың тиімді әдістерінің бірі.

Кеуекті кеңістіктегі су мен мұнайдың белгілі бір арақатынасында өнімділігі төмен коллекторларда әлсіз қозғалмалы жүйе пайда болады, бұл қабаттардың мұнай өндірісін арттырудың әдеттегі әдістерінің төмен тиімділігін тудырады. Мұндай аймақтарды жою үшін қысымның айтарлықтай өзгеруін жасау керек. Бұл мәселені шешудің ең жақсы тәсілдерінің бірі-ҚГЖ.

Материалдар мен әдістер. Мұнай кен орындарында ҚГЖ-ды кеңінен қолдану тәжірибесі көрсеткендей, бұл әдіс кен орнын немесе аумақты игеру тәсілі ретінде жобалау кезінде бүкіл қабат жүйесін, ұңғымалардың геометриялық орналасуын және олардың өндіру және айдау ұңғымаларын өңдеудің әртүрлі комбинацияларындағы өзара әсерін ескере отырып, ең жоғары тиімділікті қамтамасыз ете алады.

Қабатты гидравликалық жару процесі жасанды жасау және ұңғымаға айдалатын сұйықтықтың жоғары қысымының әсерінен кенжар аймағындағы жыныстардағы жарықтарды кеңейту болып табылады. Қысымның жоғарылауымен қабаттың жыныстарында жаңа жарықтар пайда болады немесе бар жарықтар ашылып, кеңейеді. Бұл жарықтар жүйесі ұңғыманы кенжардан алынған қабаттың өнімді бөліктерімен байланыстырады. Қысымды төмендеткеннен кейін жарықтардың жабылуын болдырмау үшін оларға ұңғымаға құйылған сұйықтыққа қосылатын ірі дәнді құм енгізіледі. Жарықтар радиусы бірнеше ондаған метрге жетуі мүмкін.

Кәсіпшілік тәжірибе көрсеткендей, гидравликалық жарудан кейінгі ұңғымалардың шығыны кейде бірнеше ондаған есе артады. Бұл пайда болған жарықтар бұрыннан бар жарықтарға қосылатындығын және ұңғымаға ағын бұрын оқшауланған жоғары өнімді аймақтардан келетіндігін көрсетеді.

Қабатқа сүзілетін сұйықтықпен қабаттың жарылуы кезінде жарықтардың пайда болу механизмі келесідей: ұңғымада сорғы агрегаттарымен пайда болатын қысыммен жару сұйықтық, ең алдымен, өткізгіштігі жоғары аймақтарға сүзіледі. Сонымен қатар, тігінен қабаттар арасында қысым айырмашылығы пайда болады, өйткені қабаттар туралы өткізгіштігі төмен немесе іс жүзінде өткізбейтін қысымнан көп қысым бар. Нәтижесінде кейбір күштер өткізгіш қабаттың төбесі мен табанына әсер ете бастайды, үстіңгі жыныстар деформацияға ұшырайды және қабаттар туралы шекараларда көлденең жарықтар пайда болады.

Сүзілмеген сұйықтықтың жарылуы кезінде қабаттың жарылу механизмі қалың қабырғалы тамырлардың жарылу механизміне ұқсас болады. Бұл жағдайда пайда болған жарықтар, әдетте, тік немесе көлбеу бағытқа ие. Сүзгіден өткен сұйықтықтың жарылуы кезінде, әдетте, сүзгіден өтпейтін сұйықтықтардың жарылуына қарағанда, жарылу қысымы айтарлықтай аз болады, өйткені соңғы жағдайда жыныстардың жарылу механизмі қалың қабырғалы ыдыстың жарылу механизміне ұқсас. Жыныспен жанасудың үлкен аймағына байланысты қабатқа енген сүзгіден өткен сұйықтық оған сүзгіден өтпейтін сұйықтықпен қабаттың ыдырауы үшін қажет болғаннан әлдеқайда аз қысыммен жарылу үшін жеткілікті үлкен күш береді. Бұрын қабаттардың жарылу қысымы тау қысымынан және тау жыныстарының жарылуға уақытша төзімділігінен асып кетуі керек деп есептелген.

Жарықтардың пайда болу механизміне сүйене отырып, жарылу қысымы көптеген факторларға байланысты болуы керек: тау қысымының

таралу мөлшері мен сипаты, тау жыныстарының беріктігі мен серпімді қасиеттері, коллекторлардың өткізгіштігі және жарылған сұйықтықтың физикалық қасиеттері, кен орнының геологиялық құрылымы, гидравликалық жару технологиясы және т. б.

Гидравликалық жару қолдану технологиясы, ең алдымен, жарықтардың геометриясын болжауға және оның параметрлерін оңтайландыруға мүмкіндік беретін тау жыныстарындағы жарықтардың пайда болуы мен таралу механизмін білуге негізделген. Жарықшақ түзілу процесін математикалық модельдеу серпімділік теориясының, мұнай-газ қабаттарының физикасының, сүзудің, термодинамиканың негізгі заңдарына негізделген. Екі өлшемді жарықшақтың таралуының жалпы мойындалған алғашқы теориялық моделі жұмыстарда ұсынылған [1-3].

ҚГЖ жүргізудің табыстылығының маңызды факторы жарықтар бойымен тасымалданатын жарылған сұйықтықтың, пропант немесе құм (құмтас) түріндегі қатты композиттердің (материалдардың) сапасы болып табылады. Жару сұйықтығының негізгі мақсаты-жарықшақты ашу үшін қажетті энергияны ұңғыманың бетінен кенжарға беру және пропантты (құмды) бүкіл жарықшақ бойымен тасымалдау. ҚГЖ сапасына әсер ететін ”жару сұйықтығы және тасымалдаушы сұйықтық” жүйесінің негізгі қасиеттері:

- ”таза” және құрамында пропант (құм) бар сұйықтықтың реологиялық қасиеттері;

- гидравликалық жару кезінде және пропантты (құмды) жарықшақ бойымен тасымалдау кезінде оның қабатқа ағып кетуін анықтайтын сұйықтықтың инфильтрациялық қасиеттері;

- сұйықтықтың пропанттың (құмның) ілулі күйдегі жарықшақтың ұштарына өтуін қамтамасыз ету қабілеті;

- пропант (құм) бөлшектерінің бір-біріне жабысып, кеуекті кеңістік пен жарықшақты бітеу мүмкіндігі;

- пропант қаптамасының және қоршаған қабаттың ең аз ластануын (колматациясын) қамтамасыз ету үшін жарылған сұйықтықты оңай және жылдам шығару мүмкіндігі;

- үзіліс сұйықтығының технологиямен, мүмкін қоспалармен және қабат сұйықтықтарымен қамтамасыз етілген әртүрлі қоспалармен үйлесімділігі;

- пропанттың (құмның) физикалық қасиеттері.

Гидравликалық жарылыстың технологиялық сұйықтықтары үлкен ашу және қатты материалмен (пропантпен) тиімді толтыру арқылы жоғары өткізгіштік жарықшағын жасау үшін жеткілікті динамикалық тұтқырлыққа ие болуы тиіс; сұйықтықтың ең аз шығынымен қажетті мөлшердегі жарықшақтарды алу үшін төмен сүзгіш ағып кетулерге ие болуы; жыныстармен және қабат сұйықтықтарымен үйлесімділікке ие болуы; жару сұйықтығымен жанасатын қабат аймағының өткізгіштігінің ең аз төмендеуін қамтамасыз етуі; құбырлардағы үйкеліс қысымының төмен жоғалуын қамтамасыз ету; өңделетін қабат үшін жеткілікті жылу тұрақтылығына ие болу; жеткілікті жоғары ығысу тұрақтылығына ие болу; өңдеуден кейін гидравликалық жару қабатынан және жарықшақтан оңай шығу; коммерциялық жағдайда дайындау және сақтау кезінде технологиялық болу; коррозиялық белсенділігі төмен болу; экологиялық таза және қолдануға қауіпсіз болу; салыстырмалы түрде төмен құны бар [4].

Ашық күйдегі жарықтарды бекіту үшін қолданылатын заманауи материалдар - пропанттар - келесідей жіктеледі: кварц құмдары, орташа және жоғары беріктігі бар синтетикалық пропанттар. Жарықтың өткізгіштігіне әсер ететін пропанттардың физикалық сипаттамаларына беріктік, түйіршіктердің мөлшері және гранулометриялық құрамы, сапасы (қоспалардың болуы, қышқылдарда ерігіштігі), түйіршіктердің пішіні (сфералық және дөңгелектік) және тығыздық сияқты параметрлер жатады [5].

Жарықтарды бекіту үшін негізгі және ең көп қолданылатын материал-құм. Оның тығыздығы шамамен 2,65 г / см^3. Құмдар әдетте қысу кернеуі 40 МПа-дан аспайтын гидравликалық жару кезінде қолданылады. Тығыздығы 2,7-3,3 г/см^3 керамикалық пропанттар 69 МПа дейін қысу кернеуінде қолданылады. Агломерация-

ланған боксит және цирконий оксиді сияқты орташа төзімді пропанттар қысу кернеуі 100 МПаға дейін қолданылады, бұл материалдардың тығыздығы 3,2-3,8 г/см^3 құрайды.

Пропанттар құмнан 2-2,5 есе үлкен жүктемелерге төтеп бере алады, бірақ олардың тығыздығы құмның тығыздығынан 40-50% асады, бұл мұндай бөлшектерді жарықтарға тасымалдауды қиындатады.

Беріктік-бұл қабаттың тереңдігінде жарықшақтың ұзақ өткізгіштігін қамтамасыз ету үшін белгілі бір қабат жағдайлары үшін пропанттарды таңдаудағы негізгі өлшем. Терең ұңғымаларда минималды кернеу көлденең болады. Тереңдікпен минималды көлденең кернеу шамамен 19 МПа/км-ге артады. Сондықтан әртүрлі тереңдіктер үшін пропанттардың келесі түрлері қолданылады: кварц құмдары-2500 м дейін; орташа беріктігі бар пропанттар-3600 м дейін; жоғары беріктігі бар пропанттар-3500 м-ден жоғары.

Пропант (құм) бөлшектеріне беріктіктен басқа, фракциялық құрамы бойынша гидравликалық жарылыстар кезінде ерекше талаптар қойылады. Құм түйіршіктерінің орташа мөлшері әдетте 0,5-0,88 мм болуы керек [3]. Бөлшектердің мөлшері ұлғайған сайын жарықтардың гидроөткізгіштігі артады, ал азайған сайын тасымалдаушы сұйықтықтың тасымалдау қабілеті артады деп саналады. Қатты фазалық бөлшектердің концентрациясы маңызды мәнге ие, оның максималды мәні бөлшектердің коалесценциясының (бір-біріне жабысуының) басталу шамасынан аспауы керек, нәтижесінде тасымалдаушы сұйықтықтың бөлшектердің жеткізілу ауқымы төмендейді, ал түсетін бөлшектер тесіктер мен жарықтарды бітеп тастауы мүмкін [4].

Көбінесе түйіршіктердің мөлшері 0,85-0,425 мм болатын пропанттар қолданылады; сирек 1,7-0,85 мм; 1,18-0,85; мм 0,425-0,212 мм. Пропант дәндерінің дұрыс мөлшерін таңдау факторлардың тұтас кешенімен анықталады. Түйіршіктер неғұрлым үлкен болса, пропанттың қаптамасы соғұрлым көп өткізгіштікке ие болады. Алайда, үлкен фракцияның пропантын қолдану, жоғарыда айтылғандай, оны жарықшақ бойымен тасымалдау кезінде қосымша қиындықтармен бірге келеді. Пропанттың беріктігі түйіршіктердің мөлшерінің ұлғаюымен төмендейді, сонымен қатар әлсіз цементтелген коллекторларда пропантты ұсақ фракцияны қолданған жөн, өйткені ұсақ бөлшектерді қабаттан шығару арқылы ірі түйіршікті пропанттың қаптамасы біртіндеп бітеліп, оның өткізгіштігі төмендейді.

Пропант түйіршіктерінің дөңгелектігі мен сфералығына оның қаптамасының жарықшақтағы тығыздығы, оның сүзуге төзімділігі, сондай-ақ тау қысымының әсерінен түйіршіктердің бұзылу дәрежесі байланысты. Пропанттың тығыздығы пропанттың жарықшақ бойымен тасымалдануы мен орналасуын анықтайды. Тығыздығы жоғары пропанттарды жарықшақ бойымен тасымалдау кезінде тасымалдаушы сұйықтықта суспензияда ұстау қиын. Жарықшақты жоғары тығыздықтағы пропантпен толтыруға екі жолмен қол жеткізуге болады: пропантты жарықшақтың ұзындығы бойынша минималды тұндырумен тасымалдайтын тұтқырлығы жоғары сұйықтықтарды қолдану немесе оларды айдау қарқыны жоғарылаған кезде тұтқырлығы төмен сұйықтықтарды қолдану. Соңғы жылдары шетелдік фирмалар тығыздықтың төмендеуімен сипатталатын жеңілдетілген пропанттарды шығара бастады.

Орташа және жоғары өткізгіш қабаттардың гидравликалық жарылуы қазіргі уақытта ұңғымаларды ынталандырудың ең қарқынды дамып келе жатқан әдістерінің бірі болып табылады. Жоғары өткізгіш қабаттарда, негізгі фактор жарықшақтың ұзындығы болып табылатын төмен өткізгіштерден айырмашылығы, ұңғыманың өнімділігінің артуы жарықшақтың еніне байланысты. Қысқа жарықтар жасау үшін жарықшақтың соңында пропантты тұндыру технологиясы қолданылады (TSO ”tip-screen-out”) [5], ол пропантты, ең алдымен, өңдеу кезінде жұмыс сұйықтығындағы концентрациясын біртіндеп арттыру арқылы жарықшақтың соңына қарай итеруден тұрады. Пропанттың жарықшақтың соңында тұндырылуы оның ұзындығының өсуіне жол бермейді. Тасымалдаушы материалды одан әрі айдау жарықшақтың енінің

ұлғаюына әкеледі, ол 2,5 см - ге дейін жетеді, ал қалыпты ҚГЖ кезінде жарықшақтың ені 2-3 мм құрайды.

Осылайша, бөлшектердің қасиеттері-беріктігі, тығыздығы, мөлшері, концентрациясы және т.б., сондай-ақ қатты фазаның қабат сұйықтығымен өзара әрекеттесу сипаты кеуек кеңістігі мен жарықтардың бітелу дәрежесін анықтайды. Бұл жағдайда әр операцияны дайындауға үнемі назар аударылады. Мұндай дайындықтың маңызды элементі-бастапқы ақпаратты жинау және талдау. ҚГЖ дайындау үшін қажетті деректерді үш топқа бөлуге болады [6]:

- қабаттың геологиялық-физикалық жағдайлары (өткізгіштігі, кеуектілігі, қанықтылығы, қабат қысымы, газ-мұнай және су-мұнай байланыстарының жағдайы, тау жыныстарының петрографиясы);

- жарықтың геометриясы мен бағдарының сипаттамасы (минималды көлденең кернеу, Юнг модулі, Пуассон коэффициенті, тау жыныстарының сығылуы және т. б.);

- жару сұйықтығының, тасымалдаушы сұйықтықтың және пропанттың қасиеттері.

Ақпараттың негізгі көздері геологиялық, геофизикалық және петрофизикалық зерттеулердің, ядроның зертханалық талдауының, сондай - ақ микро және мини – гидравликалық жарылыстар жүргізуден тұратын кәсіптік эксперименттің деректері болып табылады.

ҚГЖ жүргізудің сәттілігі операцияларды жүргізу үшін объектіні дұрыс таңдауға, осы жағдайлар үшін оңтайлы үзіліс технологиясын қолдануға, өңдеуге арналған ұңғымаларды сауатты таңдауға байланысты.

Әрбір нақты жағдайда ҚГЖ жүргізу туралы шешім қабылдау тау-кен-геологиялық жағдайларды ескере отырып жүзеге асырылады. Әдетте, әлеуетті объектінің геологиялық-физикалық қасиеттерін талдау кезінде келесі ерекшеліктер ескеріледі [7-11]:

1) бұрын құрғатылмаған қабаттар туралы аймақтарды игеруге қосу арқылы гидравликалық жарудың жоғары тиімділігін қамтамасыз ететін созылу бойынша қабаттың гетерогенділігі және қалыңдығы бойынша бөлшектену;

2) мұнай тұтқырлығы 5 мПа·с дейін болған кезде әдетте 0,03 мкм^2-ден аспауы керек қабаттың өткізгіштігі (жоғары өткізгіштік қабаттарында жергілікті ҚГЖ тиімді, бұл негізінен кенжар аймағын өңдеу құралы ретінде айтарлықтай әсер етеді);

3) өнімді қабатты газ немесе сумен қанықкан коллекторлардан бөлетін литологиялық экрандардың қалыңдығы мен төзімділігі, ол кемінде 4,5-6 м болуы керек;

4) қабаттың пайда болу тереңдігі, әдетте, 3500 м-ден аспауы керек және ҚГЖ технологиясына қойылатын талаптарды анықтайды, атап айтқанда, гидравликалық жарудан кейін ұңғымалардың шығымын едәуір және ұзақ уақытқа арттыру үшін жеткілікті, сондықтан ҚГЖ жүргізу шығындарының өтелуін қамтамасыз етеді;

5) алынатын қорлардың өндірісі, әдетте, 30% - дан аспауы керек.

Егер жарықтар қабатының сүзу сипаттамалары арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ететін жарықтар параметрлерін өңдеу және оңтайландыру үшін ұңғымаларды таңдау объектінің геологиялық-физикалық қасиеттерін, жарықтар бағытын, су басу жүйесін және ұңғымаларды орналастыруды анықтайтын қабаттағы кернеулердің таралуын ескере отырып жүзеге асырылса, ең жоғары тиімділікке қол жеткізуге болады. ҚГЖ жүргізудің әсері жекелеген ұңғымалардағы жұмыста бірдей көрінбейді, сондықтан гидравликалық жару салдарынан әр ұңғыманың шығымының өсуін ғана емес, сонымен қатар ұңғымалардың өзара орналасуының, қабаттың гетерогенділігінің нақты таралуының, объектінің энергетикалық мүмкіндіктерінің әсерін де қарастыру қажет.

Юра қабаттарының коллекторларын дамытудың қазіргі проблемаларының бірі-төменгі қабаттардың төмен сүзу-сыйымдылық қасиеттерімен және төмен бастапқы мұнаймен қанықтырумен қатар ұңғымалардың өнімділігіне үлкен әсер ететін ұңғыма аймағындағы физика-химиялық және гидродинамикалық процестерді басқару. Өкінішке орай, қазіргі уақытта

Юра қабаттары-коллекторлар бойынша зерттеу және кәсіптік ақпараттың жеткілікті көлемі жоқ, оның негізінде ұңғыма аймағындағы физика-химиялық құбылыстар мен сүзу процестерін сандық бағалауға, сондай-ақ коллектордың өткізгіштігінің төмендеуінің көптеген факторларын ескере отырып, ұңғымалардың өнімділігін қалпына келтірудің және арттырудың оңтайлы әдістерін жобалауға болады [7-10].

Кен орнының юра қабаттары ұңғымаларының әлеуетін бағалау және олардың өнімділігін арттыру мәселелерін шешу үшін зерттеу кешенін жүргізу арқылы осы мәселелерді талдау және шешу тұжырымдамасы, сондай - ақ Юра коллекторларының сүзу – сыйымдылық сипаттамаларын және ұңғымалардың өнімділігін төмендетудің негізгі факторларын ескеретін ”ұңғыма-кенжар маңы аймағы-қабат” жүйесінің сүзу моделін құру ұсынылады. Мұндай модельді құру ұңғымалар мен қабаттарға гидродинамикалық, кәсіптік-геофизикалық зерттеулер жүргізуге, сондай-ақ қабаттарға жақын жағдайларда сүзу процестерінің табиғи өзектерінде физикалық модельдеуге байланысты бірқатар мәселелерді шешуді талап етеді. Бұл, ең алдымен, ұңғымалардың маңындағы перфорация аралығындағы сұйықтықтарды сүзу геометриясын зерттеуге (ұңғымаға жақын және шалғай аймақтар), қабаттың зақымдану аймағының болуы мен тереңдігін анықтауға, өндіруші ұңғымалардағы қабаттар туралы жұмыс істемейтін жерлерді анықтауға қатысты. Екіншіден, коллекторлық қабатқа, демек, бұрғылау, технологиялық өңдеу кезінде әртүрлі факторлардың ұңғымаларының өнімділігіне әсерін бағалау үшін кешенді зерттеулер жүргізу қажет. Үшіншіден, осы міндеттерді шешу бойынша зерттеулер жүргізу жекелеген мамандардың эпизодтық жұмыстарымен емес, бірыңғай, мақсатты, кешенді бағдарлама шеңберінде орындалуы тиіс. Төмен өткізгіш коллекторлардағы ағынды қарқындату мәселелерінің әртүрлілігі мен күрделілігі жан-жақты талдауды және оларды мамандар арасында кеңінен талқылауды қажет етеді.

Ең аз зерттелген мәселе-перфорация аралығындағы сұйықтықтардың сүзілу сипатын және ұңғымалардың айналасын бағалау. Қазіргі уақытта ұңғымаларды механикаландырылған пайдалану жағдайында кен орындарын игерудің ағымдағы сатысында қабаттың және кенжар маңы аймағының сүзу қасиеттері туралы деректер, сондай-ақ коллектордың зақымдану аймағының болуы мен тереңдігі және қабаттың қалыңдығы бойынша аралықтар туралы мәліметтер іс жүзінде жоқ. Сонымен бірге ұңғымаларды гидродинамикалық және кәсіптік-геофизикалық зерттеу әдістері, сондай-ақ кенжар маңындағы аймақтың зақымдануының болуы мен тереңдігін бағалауға және қабаттың қалыңдығы бойынша жұмыс істемейтін аралықтарды анықтауға мүмкіндік беретін математикалық модельдер бар және тиімді қолданылады. Бұл ақпарат ұңғымалардың өнімділігін қалпына келтіру және арттыру технологияларын жоспарлау кезінде шешуші болып табылады.

Кенжар маңы аймағының өткізгіштігін қалпына келтіру және арттыру үшін кез келген тиімді қарқынды құрамды қолдану, егер қабаттың қалыңдығы, сондай-ақ зақымдану аймағының болуы мен тереңдігі бойынша сүзу гетерогенділігі туралы деректер болмаса, көп жағдайда оң нәтижелерге әкелмейді.

Осы әдістерді, сондай-ақ қазіргі заманғы стационарлық емес математикалық модельдерді қолдану ұңғымалардың маңында өткізгіштігі төмен немесе жоғары сақиналы аймақтардың болуын анықтауға және олардың әлеуетті өнімділігінің өзгеруін есептеуге мүмкіндік береді.

Бұрын гидравликалық жаруға ұшыраған ұңғымалардағы ағынды қарқындату әдістерін енгізу жеке мәселе болып табылады, онда пайдалану процесінде өнімділік төмендеді.

Кәсіпшілік тәжірибе көрсеткендей, жарықтардың өткізгіштігін қалпына келтіру және ұңғымалардың өнімділігін қайта арттыру әр түрлі химиялық композициялармен кенжар аймағын өңдеудің тиімді әдістерін енгізу арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Кәдімгі ұңғымалар мен ҚГЖ бар ұңғымалардың өнімділігін төмендету механизмі өте жақын. Сондықтан, Юра қабаттарындағы кәдімгі ұңғымаларды өңдеу кезінде жақсы көрсеткіштерге ие болатын жарықтардың өткізгі-

штігін қалпына келтіру кезінде қышқыл және басқа химиялық өңдеу технологиясын қолданудың жоғары тиімділігін күту керек. Осылайша, ҚГЖ-дан кейін пайдалану процесінде оны төмендеткен ұңғымалардың өнімділігін арттыру мәселелерін Юра қабаттарында шешу пайдалану қорының жұмысын егжей-тегжейлі талдауды және кенжар маңындағы аймақтың өткізгіштігін төмендетудің негізгі факторларын анықтауды талап етеді.

Жақында олар гидравликалық жару үшін ең тиімдісі тұтқырлығы төмен, әлсіз сүзілген сұйықтық болуы керек деп санайды, өйткені бұл жағдайда қабат бөгде заттармен бітеліп қалмайды, ал сұйықтықты құбырлар арқылы айдау кезінде қысымның жоғалуы аз, ал ұңғыманың кенжарындағы қысым тез артады және жарықшақ пайда болғаннан кейін жоғары деңгейде сақталады. Нәтижесінде жарықтардың көбірек ашылуы және оларды құммен жақсы толтыру қамтамасыз етіледі. Жыртылған сұйықтықтардың сүзілуін төмендететін қоспалар ретінде ВНИИ асфальтит пен мұнай қоспаларын қолдануды ұсынады.

Тұтқырлықтың жоғарылауы, сондай-ақ қабаттардың жарылуы кезінде қолданылатын сұйықтықтардың сүзілгіштігінің төмендеуі оларға тиісті қоспаларды енгізу арқылы жүзеге асырылады. Қабаттардың жарылуы кезінде қолданылатын көмірсутекті сұйықтықтарға арналған мұндай қоюландырғыштар органикалық қышқылдардың тұздары, мұнайдың жоғары молекулалық және коллоидты қосылыстары (мысалы, мұнай гудроны және басқа да мұнай өңдеу қалдықтары) болып табылады.

Карбонатты коллекторлардың жарылуы кезінде қолданылатын кейбір мұнайлар, керосин қышқылдары және мұнай қышқыл эмульсиялары және су-мұнай эмульсиялары айтарлықтай тұтқырлыққа және құмның жоғары сыйымдылығына ие. Бұл сұйықтықтар мұнай ұңғымаларында жарылған кезде жарылғыш сұйықтықтар мен құм тасымалдаушы сұйықтықтар ретінде қолданылады.

Жүргізілген есептеулер ұңғыманың маңында өткізгіштігі төмендеген аймақ болған кезде оның өнімділігі бірнеше рет төмендейтінін көрсетеді. Бұл жағдайда қабаттың зақымдану тереңдігін ескере отырып жасалған табысты қышқылдық өңдеу және басқа да кенжар аймағына әсер ету әдістері ұңғымалардың өнімділігінің едәуір артуына әкеледі. Ұңғымалардың шығымдарының 2 есе артуы, әсіресе өнімді бөлімде өткізбейтін секіргіштер болған кезде, қабаттың бекітілген аралықтарын қосу кезінде де тән. Тиісінше, өңдеудің жеткілікті тереңдігін қамтамасыз етпейтін қышқыл құрамының көлемін дұрыс есептемегенде, экспозиция объектісінің нақты геологиялық-физикалық жағдайлары үшін қышқыл ерітіндісіне қойылатын барлық талаптар сақталса да, бекітілген ұңғыманың өнімділігін едәуір арттыру мүмкін емес. Керісінше, өткізгіштігі төмен аймақ немесе (және) шектелген аралықтар болмаған жағдайда, ұңғыма шығымының өсімі базалық деңгейдің алғашқы ондаған пайызына дейін құрайды. Мұндай жағдайларда ұңғымаларды қарқынды өңдеу шығындары өтелмейді.

Сүзгілеу гетерогенділігінің жоғарыда аталған нұсқалары әр түрлі ұңғымаларда бір кен орнында да, бір ұңғымада да орын алады. Кенжар маңындағы аймақтың сүзу гетерогенділігінің әрбір түрі, сондай-ақ аутопсия дәрежесі мен сипаты бойынша жетілмегендік сұйықтықтарды сүзу геометриясына және ұңғымалардың өнімділігіне әсер етеді.

Модельдің схемасы келесі сүзгілеу гетерогенділігінің нұсқаларын қамтиды:

- қабатқа сырттан әсер етілмейді, ал кенжар аймағының өткізгіштігі қабаттың өткізгіштігіне тең;

- ұңғыма оқпанының маңында терінің оң әсерімен, сондай-ақ белгілі бір өлшемдері мен өткізгіштігімен сипатталатын нашар өткізгіштік аймағы бар;

- ұңғыма оқпанынан ең жақын аймақ сүзу сипаттамаларына ие, қабаттың сүзу қасиеттерінен жоғары және теріс тері әсерімен, сондай-ақ осы аймақтың белгілі бір геометриясымен сипатталады;

- ұңғыманың маңында өткізгіштігі өзгерген

екі аймақтың болуы өте жиі кездеседі, олардың біреуі қабаттың өткізгіштігіне ие, ал екіншісі төмен сүзу сипаттамаларына ие;

- кенжар аймағының жекелеген аралықтары толығымен шектелген.

Нәтижелер және талқылау. Сүзгілеу гетерогенділігінің барлық осы түрлері, соның ішінде аутопсия дәрежесі мен сипаты бойынша жетілмегендік (ұңғыманың маңында өткізгіштігі жақсарған аймақты қоспағанда) қосымша сүзу кедергісін тудырады, сондықтан оның өнімділігін төмендетеді. Кенжар маңы аймағының жай-күйін бағалаудың және қабаттың сүзу параметрлерін анықтаудың ең сенімді құралы қысымды қалпына келтіру қисығын жаза отырып, ұңғымаларға стационарлық емес режимде гидродинамикалық зерттеулер жүргізу болып табылады. Қабатты-гетерогенді қабаттарда өткізгіштігі нашарлаған немесе толық колматациямен қатар, кенжар аймағының өткізгіштігі қабаттың өткізгіштігінен жоғары болатын аралықтар болған кезде күрделі жағдайлар байқалады. Мұндай жағдайларда тек гидродинамикалық зерттеулер жүргізу кенжар маңындағы аймақтың сүзу кедергісі туралы толық ақпарат алуды қамтамасыз етпейді. Мұны істеу үшін оның жұмыс режиміне сәйкес депрессия кезінде ұңғымаға сұйықтық ағынының профилін одан әрі анықтау қажет. Бұдан әрі Юра кен орындарын игерудің ағымдағы сатысында ұңғымаларға гидродинамикалық және кәсіптік-геофизикалық зерттеулер жүргізу әдістері мен схемалары қаралатын болады.

Құрамында қышқыл бар қосылыстармен сазқышқылды өңдеу (СҚӨ), сазқышқылды-тұзқышқылды өңдеу (СТҚӨ) қабаттың кенжар маңы аймағын өңдеу тау жыныстарында қышқылмен еритін карбонатты материалдарды шаймалау салдарынан қабаттың кенжар маңы аймағының өткізгіштігін арттыруға және бұрғылау кезінде сазды ерітіндімен бітелген тесіктерді тазартуға мүмкіндік береді; ұңғыманың кенжарының сүзгі бетін коррозиялық шөгінділерден және тұндырғыш материалдардан тазартуға; коррозиялық материалдарды ерітуге және бетіне шығаруға сорғы-компрессорлық құбырлар (СКҚ) қабырғаларынан шөгінділер және қоршау бағаналары.

Мұнай – газ өндіру басқрмасы (МГӨБ) кен орындары жағдайында мұнай өндіруді арттыру мен мұнай өндіруді қарқындатудың қышқылдық әдістерін қолдану жұмыс жүргізілген кен орындарының игерудің бастапқы, сусыз сатысында болуына байланысты өте жоғары тиімділік береді.

Қабатқа әсер ету технологиясын құру бойынша эксперименттік жұмыстар келесі зерттеу түрлерін қамтыды:

- коллектордың минералогиялық құрамын анықтау;

- тау жынысындағы саз материалының түрі мен мөлшерін диагностикалау;

- коллектордың литологиялық құрамын, құрылымы мен құрылымын петрографиялық зерттеу;

- тау жыныстарының сүзу сипаттамаларын анықтау;

- тау жыныстарының физикалық-механикалық сипаттамаларын бағалау;

- реакция өнімдерін қабаттан депрессиялық алудың оңтайлы жағдайларын анықтау.

Қабаттың кенжар маңы аймағының жай-күйі оның диагностикасымен анықталады, оның ішінде ұңғыманың тарихын зерттеу, кен орны бойынша өкілді негізгі материалдарды сипаттау бойынша тау жыныстарының заттық және минералогиялық құрамдарын бағалау және гидродинамикалық зерттеулер жүргізу. Гидродинамикалық зерттеулердің нәтижелері бойынша реагенттерді айдау көлемі анықталады. Зерттеу деректерін (мысалы, ҚҚКҚ (Қысымды Қалпына Келтіру Қисығы)) белгілі әдістеме бойынша түсіндіру арқылы [11] өзгертілген өткізгіштік r_a және белсенді дренаж радиустары r_a келесі формулалар бойынша есептеледі:

$$r_n = (1.5 \div 2)\sqrt{\chi_1 T_1},$$

$$r_a = (1.5 \div 2)\sqrt{\chi_2 T_2},$$

мұндағы χ_1, χ_2 - ҚҚКҚ - ның бастапқы және аралық учаскесі үшін тиісінше айқындалатын

қабаттың пьезоөткізгіштігі (төмен өткізгіш коллекторы бар қабаттың кенжар аймағы үшін ҚҚКҚ S -тәрізді сипатқа ие); T_1 - ҚҚКҚ - ның бастапқы учаскесінен аралық учаскесіне өту кезінде иілу нүктесіне сәйкес келетін уақыт; - T_2 аралық учаскеден соңғы учаскеге өту кезінде иілу нүктесіне сәйкес келетін уақыт (қысымды толық қалпына келтіру аймағы) ҚҚКҚ учаскесі.

Химиялық реагенттерді айдау көлемі формула бойынша анықталады:

$$V = \pi mh(r_{x^2} - r^2),$$

мұндағы r_x - мән r_n немесе r_a;

m - кеуектілік коэффициенті;

h - қабаттың тиімді перфорацияланған қалыңдығы.

Орташа әсер ететін реагенттерді айдау көлемі, ол үшін $r_x = r_a$ қышқыл құрамын қоспағанда, $r_x = r_a$ параметрді пайдалана отырып айқындалады. Есептелген көлем сонымен қатар суды қайта сату көлемін қамтиды, ал қышқыл құрамы мен су көлемінің арақатынасы 1:1,5: 2,5 құрайды.

Осылайша, кешенді химиялық депрессиялық әсерді қолдана отырып, өткізгіштігі төмен коллекторлары бар ұңғымалардың шұңқырлы аймағын терең өңдеу технологиясы перспективті болып табылады және гидродинамикалық байланысқан айдау және өндіру ұңғымаларын қамтитын игеру элементіне әсер ету кезінде қорларды өндіруді едәуір күшейтуге мүмкіндік береді.

Сынау агентінің концентрациясы, жарықшақты жабу (жабу) кернеуі және ұңғыманың өнімділігі арасындағы тәуелділіктер қолданылады. Жарықшақты жабу кернеуі жарықшақ бойымен тұрақты болуы керек және ұңғыманы өңдеу (қарқындату) кезіндегі қысым мен оны іске қосу кезіндегі ұңғымадағы қысым арасындағы айырмашылық ретінде есептелуі керек. Өткізгіштікпен қатар модельдеу кезінде ең маңызды параметр-жарықшақтың биіктігі. Геологиялық-каротаждық жұмыстар (ГКЖ) нәтижелері әктастар үшін тұз, ацетон және құмырсқа қышқылдарын қолдану арқылы алынады. Бұл модельдің көмегімен қышқылдың ену ұзындығы мен жарықшақтың өткізгіштігін есептеуге болады. Осы модельге сәйкес ГКЖ екі кезеңде жүзеге асырылады: біріншісінде - сынғыш агентті енгізу (үзіліс сұйықтығы), екіншісінде - қышқыл айдау. Жарықшақтың белгілі биіктігінде жарықшақтағы қышқыл ағынының өрісін орнатуға болады, оның ену ұзындығын анықтау үшін жарықшақтың төменгі жағындағы қышқылдың реакция жылдамдығын білу қажет.

Зерттеу барысында доломиттерде кинетикалық реакция әктастарға қарағанда мүлдем басқаша жүреді. Қышқыл концентрациясын қышқылдың жарықшаққа ену қашықтығымен байланыстыратын шешім алынды. Бұл жағдайда қышқылдың жоғалуы болмайды деп болжанады, қышқылдың жалпы концентрациясының оның айдау аймағындағы қышқыл концентрациясына қатынасы, біреуіне тең, қышқылдың енуінің мүмкін болатын максималды қашықтығын көрсетеді және сәйкесінше ГКЖ кезінде жарықшақтың ұзындығын анықтайды. Модельдерде тері әсерінің екі түрі қабылданды: ұңғыманың кенжар аймағының бұзылуына байланысты сүзу параметрлерінің нашарлауына байланысты ламинарлы ағынның тері әсері және сұйықтықтың Дарси заңынан ауытқуына байланысты тері әсері.

Бұл жағдайда бірінші, ламинарлы тері әсері тұрақты болып қалады, ал екіншісі ағынның жылдамдығына (шығымына) байланысты.

Қабаттың өткізгіштігінің төмендеуінің алдын алу жөніндегі бірінші кезектегі іс-шаралар қабаттың ең аз зақымдануымен тиімді кептелу сұйықтықтарын қолдану болуы тиіс. Юра шөгінділеріндегі кенжар аймағының зақымдануының негізгі факторларын қарастыру ұңғымалардың өнімділігін қалпына келтіру және арттыру үшін мамандандырылған көп компонентті қышқыл ерітінділерін әзірлеу және қолдану қажеттілігі туралы қорытындыға әкеледі. Олардың құрамында коррозия ингибиторлары және темір мен басқа да тұздардың тиімді тұрақтандырғыштары, эмульсиялардың пайда болуын және жойылуын болдырмауға арналған деэмульгаторлар, сондай-ақ қышқыл ерітіндісін бейтараптан-

дыруға дейін және одан кейін мұнаймен шекарадағы фазааралық керілуді төмендетуге арналған арнайы қоспалар болуы керек. Қабаттың сумен және эмульсиямен бітелуі жағдайында деэмульгаторлар мен гидрофобизаторларды өз бетінше қолдану тиімді әдіс болады. Коллектордың қышқыл ерітінділерімен қайталама колматациялануын бір мезгілде алдын ала отырып, қабаттың әлеуетті өнімділігін қалпына келтіру жөніндегі міндетті технологиялық іс-шараларға терең енетін перфорация әдістері, қабаттың қалыңдығының 1 метріне 5-8 м^3 дейін жұмыс ерітіндісінің үлестік көлемімен көп көлемді терең қышқылды өңдеу, сондай-ақ қышқылмен өңдеу алдында СКҚ орналасуын ойып алу жолымен кеуекті арналардың темір тұздарымен ластануының алдын алу жатады. Төмен өткізгіш коллекторлардағы көп көлемді қышқылды өңдеудің болашағы мен жоғары тиімділігі.

Кен орындарын игерудің тиімділігі, ең алдымен, оны ашу процесінде де, ұңғымаларды пайдалану кезінде де әртүрлі физика-химиялық өзгерістерге ұшырайтын қабаттың кенжар маңы аймағының (ҚКМА) жай-күйімен анықталады. Сондықтан сүзу қасиеттерін жақсарту, қабылдау ағынының профильдерін теңестіру, суландыру конустары мен бағаналы ағындарды жою бойынша іс-шаралар жүргізу қажет.

ҚГЖ технологиясы қабатта төмен өткізгіш коллектордан мұнай алуды едәуір күшейтуге мүмкіндік беретін төмен сүзуге төзімділігі (ТСТ) арналар жүйесін құрумен сипатталады. Бұл процесс ҚКМА -дағы ҚГЖ -дан ұзағырақ жарықтардың пайда болуымен, сондай-ақ оларды бұрғылаудан шығару кезінде төмен өткізгіш қабатты ашатын барлық ұңғымаларда жүргізілуімен ерекшеленеді.

ҚГЖ диапазонындағы сұйықтықтың (мұнайдың) сүзілу заңдылығын зерттеу үшін біз жарылған кеуекті қабаттардың моделін қолданамыз, мұнда тау жынысы қатты біртекті орта ретінде қарастырылады, оның кез-келген нүктесінде қос кеуектілік, өткізгіштік және сүзу жылдамдығы болады (жарықтар мен кеуектер жүйесі үшін). Уақыттың бастапқы сәтінде тесіктер мен жарықтардағы қысым нөлге тең болады деп санаймыз.

Q_0 - Тұрақты ағынмен нөлдік радиустық ұңғымалар арқылы сұйықтықты қабатқа айдау кезінде модельдік есепті қарастырамыз. Содан кейін жарықтардағы қысымға қатысты шешім келесідей болады:

$$p = \frac{Q_0}{4\pi\varepsilon}\left[\ln\frac{2.25kt}{r^2} - Ei(-\frac{t}{\tau_0})\right] \qquad (1)$$

мұндағы t - уақыт, c; r - ұңғыма осінен қарастырылып отырған нүктеге дейінгі қашықтық, $м$; ε - жарықтар жүйесінің гидроөткізгіштік коэффициенті, $м^3/Па \cdot с$; $к$ - ортаның пьезоөткізгіштігі, $м^2/с$; $\tau_0 = \frac{\eta}{к}$ - кешігу уақыты, $с$;η - ортаның жарылуын сипаттайтын параметр, (жарықтар болмаған кезде $\eta = 0$); $Ei(z)$ - интегралды көрсеткіштік функция.

Ортаның ерікті нүктесіндегі қысымның уақытқа тәуелділігін талдау қысым секірісінің шамасы ұңғымада және қабат нүктелерінде уақыт аралығында сақталатынын көрсетеді

$$\frac{r^2}{к} << t << \tau_0$$

Ағынның секіргіш өзгеруінен кейін ұңғымадағы қысымның мұндай секіргіш өзгеруі жарылған кеуекті ортаның сипатымен түсіндіріледі: бұзылыстың таралуы жарықтар мен кеуекті блоктардағы қысымдар теңестірілгеннен кейін, яғни уақыт өткеннен кейін пайда болады $t \approx \tau_0$. Мұндай тұжырым ҚГЖ жүргізгеннен кейін қысымды теңестіру уақытын анықтау үшін маңызды [6].

Батыс Қазақстан кен орындарында мұнай өндіруді тұрақтандыру немесе ұлғайту мынадай жағдайлармен күрделене түсті:

1) кен орындарының игерудің кеш сатысына енуі;

2) қорлар құрылымының күрт нашарлауы (алу қиын қорлардың үлесі артады);

3) пайдалануға жеке көзқарасты талап ететін құрылымы бойынша әртүрлі кен орындарының көп санының болуы;

4) негізгі құралдарды жаңғырту үшін қаржы

ресурстарының жетіспеушілігі.

Іздеу аумағы уақытша жабылғандықтан, жаңа кен орындарының ашылуы қауіпті, бұл айтарлықтай уақыт кезеңінен кейін әсер етуі мүмкін.

Сондай-ақ, мұнай өндіруді қарқындатудың және қабаттардың мұнай өндірісін ұлғайтудың прогрессивті технологияларының салалық ауқымында есепке алуды жүргізген жөн, мұнда қолданылатын әдіс бойынша бір ұңғыма операциясы үшін инновациялық көрсеткіш берілген. Қолданылатын әсер ету түрінің тиімділігін бағалау және k_{iu} - басымдылық көрсеткішін есептеу үшін бір ұңғыма операциясы үшін формула ұсынылады:

$$k_{iu} = \frac{1}{3}\left(\frac{N_{min}}{N_i} + \frac{Э_i}{Э_{max}} + \frac{З_{min}}{З_i}\right) \qquad (2)$$

мұндағы $Э_i$, N_i және $З_i$ - сәйкесінше, қосымша қосымша өндіру, ұңғымалық операциялар саны және шығындар (мың доллар.АҚШ) i-ші әсер ету түрі үшін ($i = 1, 2, 3 \dots 9$) N_{min}, $Э_{min}$ және $З_{min}$ - сәйкесінше ұңғымалық операциялардың минималды саны, максималды мұнай өндіру және барлық әсер ету түрлерінің ең аз шығыны (әсер етудің үшінші түрі алынып тасталады).

Барлық геологиялық-техникалық іс-шаралар (ГТШ) екі үлкен топқа бөлінеді: жылу, газ және физика - химиялық әсерлерді қамтитын қабаттардың мұнай бергіштінін арттыру әдістері (МБАӘ); қабатқа әсер ету әдістері және ұңғыма технологиялары-ҚГЖ, жүйенің жұмыс режимдерін реттеу технологиялары.

Бірінші топтың әдістері дәстүрлі су айдау әдісімен салыстырғанда қорларды өндіруді жақсартуға бағытталған принципті технологиялық шешімдер кешені болып табылады. Бұл әдістердің айрықша ерекшелігі-әрбір нақты жағдайда ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізу үшін ғылыми – техникалық прогрессті қолдану қажеттілігі, сондай-ақ шығындар сипаты, технологиялық және экономикалық тәуекелдің жоғарылауы.

Екінші топтың әдістері қазіргі заманғы ғылым мен практикада сәтті сыналған әдістер мен технологиялар болып табылады, олар әзірленген бағдарламалық-имитациялық модельдер негізінде типтік тапсырмалар мен шешімдерді қолданады. Осы топ үшін қабаттың мұнай бергіштігін арттыру (ҚМБА) әдістерін енгізу тәжірибесі жоғары экономикалық көрсеткіштері бар ең тиімді технологияларды таңдауға мүмкіндік береді.

Мұнай бергіштік коэффициентін (МБК) арттыру әдісін қолданудың техникалық-экономикалық негіздемесі кезінде бір кен орны шегінде ұңғымалар тобы бойынша және геологиялық-физикалық сипаттамалары жақын игеру ауданы шегінде кен орындары тобы бойынша әдістің тиімділігін белгілеу басты рөл атқарады. Осы мақсат үшін әдістің жарамдылық дәрежесі ұңғымаларды пайдалануға беру және осы әдісті қолдана отырып кен орындарын игеру кезектілігін анықтайтыны анық. Әдістің жарамдылық дәрежесін бағалау қарастырылып отырған ұңғыманы немесе кен орындарын неғұрлым толық сипаттайтын және таңдау белгілерінің рөлін атқаратын x_i параметрлер жиынтығы бойынша белгіленеді.

Қабаттардың өнімділігін арттырудың объективті мүмкіндігі қарастырылып отырған объектілердің ҚГЖ әдісінің белгілі бір модификацияларын қолдануға жарамдылығына қарай артады. Ұңғымалар бойынша қолданылатын әсер ету түрінің тиімділігін таңдаудың 7 белгісі арқылы бағалаймыз: коллекторлардың тиімді қалыңдығы $h(м)$, объектінің тереңдігі $L(м)$, сұйықтықтың көлемді айдалуы $Q^{(айдау)}(м^3)$, сулану (пайызбен) $Q^{(қос)}$, өндірілетін сұйықтық көлемі $Q^{(өнд)}\epsilon$, қосымша мұнай $Q^{(қос)}тонна/сут$, ұңғыманың жұмыс уақыты $T_{(сағ)}$.

i - ұңғыма әдісінің k_i - жарамдылық көрсеткішін формула арқылы анықтаймыз:

$$k_i = \frac{1}{7}\left[\frac{L_{min}}{L_i} + \frac{h_i}{h_{\max}} + \frac{Q_{\min}^{(айд)}}{Q_i^{(айд)}} + \frac{Q_{min}^{(өнд)}}{Q_i^{(өнд)}} + \frac{Q_{\min}^{(сул)}}{Q_i^{(сул)}} + \frac{Q_i^{қос}}{Q_{\max}^{қос}} + \frac{T_{\min}}{T_i}\right]$$

Мұндағы, $L_{\min}, h_{\max}, Q_{\min}^{(айд)}$, $Q_{\min}^{(өнд)}$, $Q_{\min}^{(сул)}$, $Q_{\max}^{(қос)}$, $T_{\min}$ -арқылы тиісті үлгілердің экстремалды мәндері. Батыс Қазақстан *Х* және *У* екі кен орнындағы үш ұңғыма үшін ҚГЖ әдісінің тиімділік көрсеткішін анықтау әдісін қолданамыз (1, 2-кесте). Есептеулерде ҚГЖ жүргізілгеннен кейін ұңғымалардың жұмыс режимінің деректері пайдаланылды [6].

1-кесте. Х кен орнының геологиялық-физикалық параметрлері

№	Параметрлер	Экстремалды	Ұңғымалар		
			№654	№525	№655
1	Тиімді қалыңдық, $h(м)$	7	6	6	7
2	Жатыс тереңдігі, $L(м)$	2251	2850	2742	2251
3	Айдау көлемі, $Q^{(айд)}(м^3)$	47	47	81	85
4	Өндірілген сұйықтық көлемі, $Q^{(сул)}тонн/тәулік$	3	22,2	25,4	3
5	Сулану, $Q^{(сул)}$(%)	5	8	8	5
6	Қосымша мұнай көлемі, $Q^{(қос)}$ $тонн/тәулік$	8241	104	8241	1067
7	Жұмыс сағаттарының саны $T(10^3$сағат)	10,08	10,08	11,49	10,99
8	Әдістің тиімділік көрсеткіші	-	0,635	0,697	0,800

2-кесте. У - кен орнының геологиялық-физикалық параметрлері

№	Параметрлер	Экстремалды	Ұңғымалар		
			№84	№88	№69
1	Тиімді қалыңдық, $h(м)$	7	6	6	7
2	Жатыс тереңдігі, $L(м)$	2255	2254	2255	2255
3	Айдау көлемі, $Q^{(айд)}(м^3)$	55	55	83	83
4	Өндірілген сұйықтық көлемі, $Q^{(өнд)}тонн/тәулік$	5,6	32,5	11,7	5,6
5	Сулану, $Q^{(сул)}$ (пайыз)	20	20	75	87
6	Қосымша мұнай көлемі, $Q^{(қос)}$ $тонн/тәулік$	188,8	188,8	79,1	66,3
7	Жұмыс сағаттарының саны $T(10^3$сағат)	10,03	11,06	10,48	10,03
8	Әдістің тиімділік көрсеткіші	-	0,848	0,663	0,750

Кестелік мәліметтерден Х кен орны үшін тиімділіктің ең үлкен көрсеткіші №655 ұңғымаға ие екендігі шығады, өйткені мұнда өнімді қабаттың тиімді қалыңдығы максималды мәнге ие және құрамында қосымша мұнай бар өндірілетін сұйықтық көлемі ең аз мәнге ие. Сонымен қатар, бұл ұңғыманың тереңдігі мен сулануының ең кіші мәндері бар. Бұл үлгілердің мәндері ұңғыманың өнімділігін арттыру үшін әдістің жарамдылық дәрежесін түпкілікті бағалау үшін оң рөл атқарады. Кен орын үшін № 84 ұңғыма ең жоғары көрсеткішке ие, мұнда қосымша мұнай өндіру және төмен сулану шешуші рөл атқарады.

Қорытынды. Іздестіру-барлау жұмыстарын жүргізуге уақытша шектеу жағдайында жаңа кен орындарын ашу перспективалары өте белгісіз болып қалады. Мұндай жағдайларда геологиялық барлау жоғары тәуекелдермен байланысты және сәтті болса да, ұзақ уақыт өткеннен кейін ғана нақты нәтиже бере алады. Сондықтан Батыс Қазақстанның жұмыс істеп тұрған мұнай объектілерінде бүгінде өндіру көлемін ұлғайтудың бірден — бір мүмкіндігі-игерілген қабаттардың мұнай беруін арттыруға және қолданыстағы кен орындарын игеруді оңтайландыруға бағытталған қарқындатудың заманауи технологияларын-әдістерді енгізу болып табылады.

Батыс Қазақстанның бірнеше кен орындарын игеру объектілері үшін таңдаудың 8 белгісі арқылы ұңғымалар бойынша қолданылатын әсер ету түрінің тиімділігі бағаланды. Өндіру деңгейін арттырудың объективті мүмкіндігі қарастырылып отырған объектілердің ҚГЖ әдісінің белгілі бір модификацияларын қолдануға жарамдылығына қарай артады.

ҚГЖ-дан кейінгі көрсеткіштерді нашарлатқан мұнай ұңғымаларының шығымын арттыру мәселесін шешу қабатқа әсер етудің қосымша әдістерін қолдануды талап етеді. Юра қабаттарында пайдалану қорының жұмысын егжей-тегжейлі талдау, сондай-ақ кенжар аймағының өткізгіштігінің төмендеуінің негізгі факторларын анықтау қажет.

Әдебиеттер

1. Батыров М.И. Техника и технология проведения ГРП на Ем-Ёговской площади Красноленинского месторождения // Отраслевые научные и прикладные исследования: Науки о Земле. -2020. -№ 4. -С.89–106.

2. Султанов Ш.Х., Мухаметшин В.Ш., Стабинскас А.П. и др. Исследование возможности использования воды с высокой минерализацией для гидравлического разрыва пласта // Записки Горного института. -2024. -Т.270. - С.950-962.

3. Казинский А.А. и др. Требования к жидкостям разрыва при проведении ГРП на месторождении Карачаганак // Наука и образование. -2023. -Т.2. -№ 4 (73). -С.265-273. DOI 10.52578/2305-9397-2023-4-2-265-273.

4. Галлямов А.Р. Эффективность применения гидроразрыва пласта // Международный научный журнал «Вестник Науки». -2025. –Т.5. -№ 8(89). -С.327-334.

5. Исламов Я.Р., Нурлыгаянова Э.Р., Вагизов А.М. и др. Развитие технологий гидравлического разрыва пласта для карбонатных отложений каширского и подольского горизонтов Арланского нефтяного месторождения // Георесурсы. - 2024. -Т.26(4). -С.200-208. DOI 10.18599/grs.2024.4.21.

6. Бухарбаева А.Н., Асанов К.Б., Башев А.А., Джаксылыков Т.С., Марданов А.С. Перспективы повышения эффективности гидроразрыва пласта с использованием высокотехнологичных проппантов на месторождениях Атырауского региона// Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. -2024. -Т.6(4). -С.49-67. DOI 10.54859/kjogi108775.

7. Асанов К.Б. Опыт применения многостадийного гидроразрыва пласта в обсаженном стволе вертикальной скважины. // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. -2019. -№ 1. -С.88-94. ISSN 2707-4226.

8. Волокова М.А., Петухова Е.В. Гидравлический разрыв пласта высокоэффективный метод интенсификаций добычи нефти //Успехи в химии и химической технологии. -2023. –Т.37(4). - С.52-63.

9. Бисенгалиев М.Д., Баямирова Р.У., Жолбасарова А.Т., Тогашева А.Р., Сарбопеева М.Д. Мероприятия по улучшению эффективности гидравлического разрыва пласта и Скин-ГРП // Журнал нефти и газ. -2023. -Т.1 (133). - С.81-93. DOI 10.37878/2708–0080/2023-1.07.

10. Мазо А.Б., Хамидуллин М.Р. Явно-неявные алгоритмы ускорения расчета двухфазного притока к горизонтальной скважине с многостадийным гидроразрывом пласта// Вычислительные методы и программирование. -2017. -Т.18(3). - С.204 – 213. DOI 10.26089/NumMet.v18r318.

11. Mukherjee H., Economides M.J. A parametric comparison of horizontal and vertical well performance // SPE Form Eval. -1991. -Vol.6 (2). -P.209-216. DOI 10.2118/18303- PA.

References

1. Batyrov M.I. Tehnika i tehnologija provedenija GRP na Em-Jogovskoj ploshhadi Krasnoleninskogo mestorozhdenija // Otraslevye nauchnye i prikladnye issledovanija: Nauki o Zemle. -2020. -№ 4. -S.89-106. [in Russian]

2. Sultanov Sh.H., Muhametshin V.Sh., Stabinskas A.P. i dr. Issledovanie vozmozhnosti ispol’ zovanija vody s vysokoj mineralizaciej dlja gidravlicheskogo razryva plasta // Zapiski Gornogo instituta. -2024. -T.270. - S.950-962. [in Russian]

3. Kazinskij A.A. i dr. Trebovanija k zhidkostjam razryva pri provedenii GRP na mestorozhdenii Karachaganak // Nauka i obrazovanie. -2023. -T.2. -№ 4 (73). -S.265-273. DOI 10.52578/2305-9397-2023-4-2-265-273. [in Russian]

4. Galljamov A.R. Jeffektivnost’ primenenija gidrorazryva plasta // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Vestnik Nauki». -2025. –T.5. -№ 8(89). -S.327-334. [in Russian]

5. Islamov Ja.R., Nurlygajanova Je.R., Vagizov A.M. i dr. Razvitie tehnologij gidravlicheskogo razryva plasta dlja karbonatnyh otlozhenij kashirskogo i podol’ skogo gorizontov Arlanskogo neftjanogo mestorozhdenija // Georesursy. - 2024. -T.26(4). -S. 200-208. DOI 10.18599/grs.2024.4.21. [in Russian]

6. Buharbaeva A.N., Asanov K.B., Bashev A.A., Dzhaksylykov T.S., Mardanov A.S. Perspektivy povyshenija jeffektivnosti gidrorazryva plasta s ispol’ zovaniem vysokotehnologichnyh proppantov na mestorozhdenijah Atyrauskogo regiona// Vestnik neftegazovoj otrasli Kazahstana. -2024. -T.6(4). - C.49-67. DOI 10.54859/kjogi108775. [in Russian]

7. Asanov K.B. Opyt primenenija mnogostadijnogo gidrorazryva plasta v obsazhennom stvole vertikal’ noj skvazhiny. // Vestnik neftegazovoj otrasli Kazahstana. -2019. -№ 1. -C.88–94. ISSN 2707- 4226. [in Russian]

8. Volokova M.A., Petuhova E.V. Gidravlicheskij razryv plasta vysokojeffektivnyj metod intensifikacij dobychi nefti //Uspehi v himii i himicheskoj tehnologii. -2023. –T.37(4). - C.52-63. [in Russian]

9. Bisengaliev M.D., Bajamirova R.U., Zholbasarova A.T., Togasheva A.R., Sarbopeeva M.D. Meroprijatija po uluchsheniju jeffektivnosti gidravlicheskogo razryva plasta i Skin-GRP // Zhurnal nefti i gaz. -2023. -T.1 (133). -C.81-93. DOI 10.37878/2708–0080/2023-1.07. [in Russian]

10. Mazo A.B., Hamidullin M.R. Javno-nejavnye algoritmy uskorenija rascheta dvuhfaznogo pritoka k gorizontal’ noj skvazhine s mnogostadijnym gidrorazryvom plasta// Vychislitel’ nye metody i programmirovanie. -2017.-T.18(3). - S.204 – 213. DOI 10.26089/NumMet.v18r318.

11. Mukherjee H., Economides M.J. A parametric comparison of horizontal and vertical well performance // SPE Form Eval. -1991. -Vol.6 (2). -P. 209–216. DOI 10.2118/18303- PA.

Авторлар туралы мәлметтер

Бисенгалиев М.Д. - техника ғылымының кандидаты, профессор, «С.Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті» КеАҚ, Атырау, Казахстан, e-mail: maks_bisengali@mail.ru;

Сулейменова Р.Т. - PhD, техника ғылымының кандидаты, қауымдастырылған профессор,

«С.Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті» КеАҚ, Атырау, Казахстан, e-mail: raikhan.suleimenova@aogu.edu.kz;

Мухаммад Насир - PhD, Химия ғылымдары мектебі, Малайзия зерттеу университеті, Пинанг, Малайзия, e-mail: mnm@ysm.my;

Досказиева Г.Ш. - техника ғылымының кандидаты, профессор, «С.Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті» КеАҚ, Атырау, Казахстан, e-mail: doskaziyeva.gulsin@gmail.com;

Зайдемова Ж.К. - техника ғылымының кандидаты, профессор, «С.Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ

Тулегенова О.Ш, - техника ғылымының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «С.Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті», Атырау, Казахстан;

Шаяхметова Ж.Б. - техника ғылымының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «С.Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті» КеАҚ, Атырау, Казахстан, e-mail: zhanar6688@mail.ru;

Каримова А.С. - техника ғылымының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «С.Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті» КеАҚ, Атырау, Казахстан, akmaral0167@mail.ru.

Information about the authors

Bissengaliyev M.D. - Ph, professor, S. Utebaev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: maks_bisengali@mail.ru;

Suleimenova R.T. - PhD, ass. professor, S. Utebaev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: raikhan.suleimenova@aogu.edu.kz;

Nasir M.- PhD, School of Chemical Sciences, Universiti Sains Malaysia, Pinang, Malaysia e-mail: mnm@ysm.my;

Doskazieva G.SH. - Ph, ass. Professor, S. Utebaev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: aing-zhomart@mail.ru;

Zaidemova Zh.R. - Ph, professor, S. Utebaev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: b.n.m.99@list.ru;

Tulegenova O.SH. - Ph, ass. professor, S. Utebaev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: olympiada70@mail.ru;

Shayakhmetova Zh.B.- Ph, ass. professor, S. Utebaev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: zhanar6688@mail.ru;

Karimova A.S. - Ph, ass. professor , S. Utebaev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: akmaral0167@mail.ru.

МРНТИ 52.13.17, 52.13.15, 52.01.75 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1515**

ОПТИМИЗАЦИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОБЫЧИ РУД В ЗОНАХ ОБРУШЕНИЯ ЖЕЗКАЗГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭММ

[1]Д.К. Бекбергенов, [2]И.Н. Савич, [3]А.А. Зейнуллин, [1]Ж. Бимурат, [4]Р.К. Жанакова

[1]Институт горного дела им. Д. А. Кунаева, Алматы, Казахстан,
[2]Горный институт НИТУ МИСиС, Москва, Российская Федерация,
[3]АО «Казахский университет технологии и бизнеса им.К.Кулажанова», Астана, Казахстан,
[4]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
Корреспонденты-авторы: kdbekbergen@mail.ru, zhanakova_raisa@mail.ru

Статья посвящена решению стратегической задачи вовлечения в отработку нетронутых залежей шахты «Анненская» Восточно-Жезказганского рудника, находящихся в зонах обрушения с активным сдвижением массива. В условиях, где традиционные геотехнологии неэффективны, обосновано применение сплошной системы разработки с обрушением и торцевым выпуском руды, усиленной комбинированной крепью СВП-22.

Научная новизна исследования заключается в разработке и применении экономико-математической модели (ЭММ) критерием оптимизации которой является получение максимальной прибыли на основе регрессионного анализа с регуляризацией.

Использование стандартизированной формы уравнения прибыли позволило авторам впервые корректно сопоставить разнородные факторы (геометрию залежи, объемы добычи и качественные показатели). Модель выявила нелинейный характер влияния потерь и разубоживания на финансовый результат, а также определила роль тектонического сдвига как модификатора чувствительности прибыли к изменению угла залегания рудных тел. В результате исследования установлены критические зависимости: получено семейство вогнутых кривых (поверхностей отклика), описывающих экстремумы прибыли. Доказано, что при увеличении угла падения свыше 30 градуса область рентабельности резко сужается, а поддержание сверхнизкого уровня потерь становится экономически нецелесообразным из-за опережающего роста эксплуатационных затрат. Установлен технологический предел применения метода - угол падения до 45 градуса. Практическая значимость работы состоит в создании компактного математического инструмента, позволяющего определять точки безубыточности и выбирать оптимальные стратегии размещения буро-доставочных штреков в условиях высокой неопределенности нарушенного массива.

Ключевые слова: экономико-математическая модель, нетронутые залежи, математическое моделирование, система разработки, прибыль, зона обрушения, буро-доставочный штрек.

ЭММ НЕГІЗІНДЕ ЖЕЗҚАЗҒАН КЕН ОРНЫНЫҢ ОПЫРЫЛУ АЙМАҚТАРЫН ИГЕРУ КЕЗІНДЕГІ ПАЙДАНЫ БОЛЖАУ

[1]Д.К. Бекбергенов, [2]И.Н. Савич, [3]А.А. Зейнуллин, [1]Ж. Бимурат, [4]Р.К. Жанакова

[1]А. Қонаев атындағы тау-кен ісі институты, Алматы, Қазақстан,
[2]НИТУ МИСИС, Москва, Россия,
[3]«Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана. Қазақстан,
[4]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан,
e-mail: kdbekbergen@mail.ru, zhanakova_raisa@mail.ru

Мақала массивтің белсенді жылжу аймақтарында орналасқан «Анненская» шахтасының тиілмеген кен жатындарын игеруге тартудың стратегиялық міндетін шешуге арналған. Дәстүрлі геотехнологиялар тиімсіз болатын жағдайларда, СВП-22 құрамдастырылған бекітпесімен күшейтілген,

кенді опыру және шеткі шығарумен жаппай өңдеу жүйесін қолдану негізделген. Зерттеудің ғылыми жаңалығы регуляризацияланған регрессиялық талдау негізінде экономикалық-математикалық модельді (ЭММ) әзірлеу және қолдану болып табылады.

Пайда теңдеуінің стандартталған формасын пайдалану авторларға алғаш рет әртүрлі факторларды (жатынның геометриясын, өндіру көлемін және сапалық көрсеткіштерді) дұрыс салыстыруға мүмкіндік берді. Модель кеннің ысырабы мен кедейленуінің қаржылық нәтижеге әсерінің сызықты емес сипатын анықтады, сондай-ақ тектоникалық ығысудың кен денелерінің жату бұрышының өзгеруіне пайданың сезімталдық модификаторы ретіндегі рөлін айқындады.

Зерттеу нәтижесінде критикалық тәуелділіктер анықталды: пайданың экстремумдарын сипаттайтын ойыс қисықтар (жауап беру беттері) жиынтығы алынды. Кеннің құлау бұрышы 30 градустан асқанда рентабельділік аймағы күрт тарылатыны, ал ысыраптың өте төмен деңгейін сақтау пайдалану шығындарының жедел өсуіне байланысты экономикалық тұрғыдан тиімсіз болатыны дәлелденді. Әдісті қолданудың технологиялық шегі құлау бұрышы 45 градусқа дейін екені белгіленді. Жұмыстың практикалық маңыздылығы бұзылған массивтің жоғары белгісіздік жағдайында шығынсыздық нүктелерін анықтауға және бұрғылау-жеткізу штректерін (БЖШ) орналастырудың оңтайлы стратегияларын таңдауға мүмкіндік беретін ықшам математикалық құралды жасаудан тұрады.

Түйін сөздер: экономикалық-математикалық модель, тиілмеген кен оырндары, математикалық модельдеу, өңдеу жүйесі, пайда, тасымалдау штрегі

PROFIT FORECASTING FOR MINING DEPOSITS IN CAVING ZONES OF THE ZHEZKAZGAN FIELD BASED ON EMM

[1]D.K. Bekbergenov✉, [2]I.N. Savich, [3]A.A. Zeinullin, [1]Zh. Bimurat, [4]R.K. Zhanakova✉

[1]D.A. Kunaev Institute of Mining, Almaty, Kazakhstan,
[2]Mining Institute of NUST MISIS, Moscow, Russian Federation, Moscow, Russia,
[3]«K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business» JSC, Astana, Kazakhstan,
[4]K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: kdbekbergen@mail.ru, zhanakova_raisa@mail.ru

The article addresses the strategic challenge of extracting untouched deposits at the Annenskaya mine (East Zhezkazgan Mine), which are located within caving zones characterized by active rock mass displacement Given the inefficiency of traditional geotechnologies, the use of a continuous mining system with caving and sublevel (end) drawing, reinforced with SVP-22 combined support, is justified.

The scientific novelty of the research lies in the development and application of an economic-mathematical model (EMM) based on regression analysis with Lasso regularization.

The use of a standardized profit equation allowed the authors for the first time to correctly compare heterogeneous factors (deposit geometry, production volumes, and quality indicators). The model revealed the non-linear nature of the impact of losses and dilution on the financial result and identified the role of tectonic shift as a modifier of profit sensitivity to changes in the dip angle. As a result of the study, critical dependencies were established: a family of concave curves (response surfaces) describing profit extrema was obtained. It is proved that with an increase in the dip angle beyond 30 degrees, the profitability zone narrows sharply, and maintaining an ultra-low level of losses becomes economically inexpedient due to the outstripping growth of operating costs. The technological limit of the method is set at a dip angle of up to 45 degrees. The practical significance of the work lies in the creation of a compact mathematical tool that allows determining break-even points and choosing optimal strategies for locating drilling-and-delivery drifts (DDD) under high uncertainty of a disturbed rock mass.

Keywords: economic-mathematical model, intact ore bodies, mathematical modeling, mining system,

profit, drilling and transport tunnels

Введение. Современный этап эксплуатации Жезказганского месторождения характеризуется переходом к освоению запасов в экстремально сложных геомеханических условиях. Одной из наиболее острых проблем является наличие значительных объемов «нетронутых» залежей, оказавшихся заблокированными в зонах обрушения и мульдах сдвижения массива, в частности на шахте «Анненская» ВЖР. В таких условиях традиционные методы камерно-столбовой отработки становятся неэффективными и опасными из-за высокого риска неконтролируемых обрушений, неопределенности морфологии рудных тел и неизбежно высоких потерь полезного компонента. Вовлечение этих трудноизвлекаемых ресурсов в рентабельную эксплуатацию требует внедрения принципиально новых технологических решений и инструментов точного экономического прогнозирования.

В качестве адекватного ответа на сложную геомеханическую обстановку [1] предлагается переход к технологии сплошной системы разработки с обрушением и торцевым выпуском руды. Данное решение позволяет исключить нахождение персонала в опасных зонах за счет использования буро-доставочных штреков (БДШ) малого сечения. Для обеспечения устойчивости выработок в нарушенном массиве применяется комбинированная крепь, сочетающая анкерное крепление и металлический спецпрофиль СВП-22 [2]. Однако принятие решений об отработке конкретных блоков осложняется многофакторностью процесса: на финальную прибыль влияют не только горно-геологические параметры (мощность, угол падения), но и переменные показатели разубоживания, потерь и растущие затраты на поддержание выработок.

Параллельно с технологическим перевооружением, развитие вычислительной техники и внедрение геоинформационных систем (ГИС) открывают возможности для высокоточного проектирования. Накопленный массив геологических данных по Анненскому рудному полю Жезказганского месторождения послужил фундаментом для создания экономико-математической модели (ЭММ), адекватно отражающей пространственную геометрию рудных тел даже в условиях зон обрушения. Использование многофакторных квадратичных моделей позволяет установить четкую математическую зависимость между параметрами отработки и финансовым результатом, обеспечивая научное обоснование выбора наиболее эффективной схемы размещения БДШ.

Целью данной работы является выбор и обоснование оптимальных качественных показателей добычи руды на основе прогнозной модели получения максимальной расчетной прибыли на ЭММ для минимизации геологических рисков и максимизации извлечения запасов. Благодаря построению уточненных блочных моделей, авторами реализована возможность не только прецизионного подсчета объемов руды при сложных горно-геологических условиях, но и проведения сценарного анализа рентабельности. Такой комплексный подход сочетание безопасной технологии торцевого выпуска и математической оптимизации параметров добычи позволяет эффективно вовлекать в эксплуатацию ранее оставленных нетронутых залежей, обеспечивая устойчивое развитие Жезказганского месторождения на его завершающей стадии [3].

Для эффективного извлечения запасов, сосредоточенных в нетронутых залежах Анненского рудного поля, обосновано применение сплошной системы разработки с обрушением и торцевым выпуском руды [4]. Данная технология наиболее адаптивна к условиям нарушенного массива, так как позволяет вести добычу без формирования открытого очистного пространства. Основным конструктивным параметром блока здесь выступает мощность рудной залежи, определяющая его высоту, в то время как шаг обрушения слоя принимается равным величине линии наименьшего сопротивления (ЛНС) взрываемого веера скважин. Для сохранения устойчивости выработок и минимизации сейсмического воздействия на вмещающий массив, отбой-

ка производится путем взрывания одного веера с применением схем короткозамедленного детонирования.

Подготовка выемочных участков реализуется через проходку буро-доставочных штреков (БДШ) для каждой панели блока. Выбор способа их поддержания напрямую зависит от локальных горно-геологических условий: выработки проводятся либо без крепления, либо с применением комбинированной системы усиления. В последнем случае используется анкерное крепление кровли в сочетании со стальными арочными рамами из специального взаимозаменяемого профиля (СВП-22) [5-7]. Схема бурения, представленная на разрезе Б-Б (рисунок 1), предусматривает веерное расположение скважин по рудному телу с обязательным перебуром до двух метров во вмещающие породы, что гарантирует полноту извлечения и надежную фиксацию анкеров в устойчивой части массива.

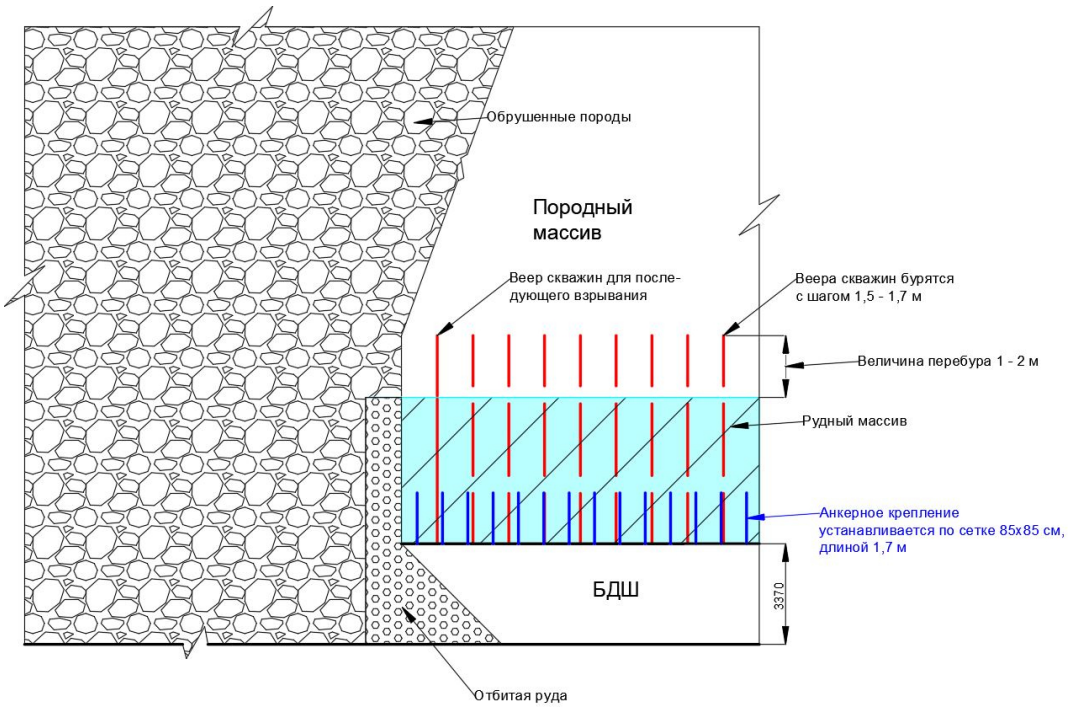


Рис.1 - разрез Б - Б при проходке БДШ по нетронутой рудной залежи рекомендуемой сплошной системой обрушения и с торцевым выпуском рудной массы в условиях зоны обрушения с размещением схемы бурения вееров скважины по руде и с перебуром до 2 метров во вмещающем породном массиве и анкерного крепления кровли БДШ

Особое внимание в работе уделено применению металлических трехзвенных податливых крепей из профиля СВП-17 и выше [6,7]. Конструктивно такая крепь состоит из отдельных арок (включающих верхняк и две стойки), устанавливаемых с шагом 0,5–1,2 м и объединенных в единый каркас межрамными стяжками. Использование желобчатого спецпрофиля и узлов податливости на основе скоб с планками позволяет крепи воспринимать значительные деформации массива без потери несущей способности. Для предотвращения вывалов между арками устанавливаются деревянные, железобетонные или металлические затяжки.

Внедрение данных конструкций рекомендуется для выработок, проводимых в слабых, сильнотрещиноватых и неустойчивых породах с коэффициентом крепости f = 3-9 при углах наклона до 30°. Выбор конкретного типоразмера профиля (от СВП-14 до СВП-33[2]) осуществляется исходя из расчетной величины ожидаемых смещений массива в зоне мульдыижения шахты

«Анненская». Такой комплексный подход к креплению и подготовке БДШ обеспечивает безопасность персонала и оборудования при последующем выполнении буровзрывных работ и погрузке отбитой горной массы самоходными ПДМ.

Подготовительный цикл работ при реализации предложенной системы предполагает проведение сети буро-доставочных штреков по простиранию рудного тела. Проходка БДШ осуществляется от существующих или специально возведенных разрезных штреков (ортов) и продолжается до полной границы выклинивания залежи или на расчетную длину панели. С целью обеспечения планомерного извлечения запасов штреки закладываются с интервалом 12 метров, начиная от верхней границы блока с последовательным развитием фронта работ по падению залежи.

Учитывая геологическую изменчивость Жезказганского месторождения, технологическая схема адаптирована под различные геомеханические сценарии. Основными переменными факторами выступают мощность рудной залежи (в диапазоне 6, 8, 10 и 12 м) и углы её падения, составляющие 30° и 50°. Исследованием охвачены типовые варианты отработки, учитывающие эти характеристики: например, наклонные залежи мощностью 6 м при угле падения 30°, а также более крутые пласты мощностью 9 м с углом залегания 50° . Данная система разработки рекомендуется в вариантах по мощности залежи (6, 8, 10, 12 м) и углах падениях залежи 30 и 50 градусов (см. рисунки 2 и 3).

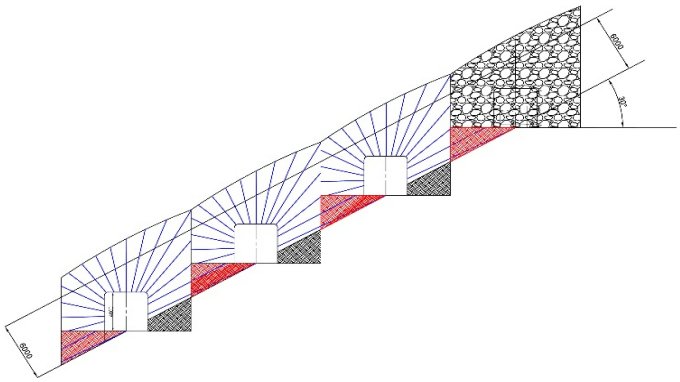


Рис.2 - Вариант технологической схемы отработки нетронутых залежей при мощности 6 м и угле падения рудного тела - 30º

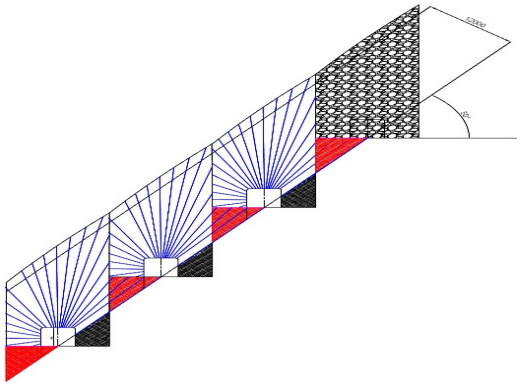


Рис.3 - Вариант технологической схемы отработки нетронутых залежей при мощности 6 м и угле падения рудного тела - 50º

Представленные графические модели (рис.2 и 3) иллюстрируют рациональное расположение БДШ и конфигурацию очистной выемки, обеспечивающие устойчивость массива в условиях зоны обрушения. Стоит отметить, что данные варианты являются базовыми: в ходе дальнейших исследований планируется расширение вариативности технологических схем для охвата всего спектра горно-геологических условий шахты «Анненская». Это позволит сформировать универсальный алгоритм выбора параметров системы разработки, исходя из конкретных метрических данных каждого блока.

Материалы и методы. *Экономико-математическое моделирование и оптимизация качественных параметров добычи критерием максимальной прибыли Жезказганского месторождения на основе многофакторных квадратичных моделей.*

В процессе выполнения основных этапов математического моделирования были рассмотрены основные факторы, влияющие на точность получаемой модели и приведены два основных фактора – потери и разубоживание, которые

определяют необходимую и достаточную точность модели месторождения. Учет потерь, как неизвлеченные из недр запасы и разубоживания, как засорение руды в добыче полезных ископаемых контролирует то, как полно извлекается ценное сырье из недр и как снижается его качество из-за примесей пустой породы, что критично для оценки запасов, планирования и экономической эффективности [8,9].

На данном исследовании рассматривается квадратичная факторная модель прибыли, в основу которой положен мультипликативный принцип: итоговая прибыль определяется как произведение базовой прибыли, основанную на принципе:

Прибыль = Базовая прибыль х Влияние угла наклона залежи х Влияние потерь и разубоживания, где каждый множитель имеет квадратичную форму с максимумом в целевой точке.

Оптимизирующим критерием выбора лучших качественных параметров добычи руд является получение максимальной прибыли: П = Ц – С → max, где, Ц – ценность руды.

В показатель себестоимости добычи С суммируется ущерб от потерь и разубоживания руды.

Общая формула прибыли:

$$П(\theta, L, D) = П_{ref} \times \Phi_\theta(\theta) \times \Psi_{LD}(L, D) \quad (1)$$

Влияние угла падения (Φ_θ):

$$\Phi_\theta = \max\left(0; 1 - k_\theta \times \left(\frac{\theta - \theta^*}{\Delta\theta}\right)^2\right) \quad (2)$$

Нормализация отклонения $\frac{\theta-\theta^*}{\Delta\theta}$ приводит отклонение к безразмерному виду.

Квадратичный штраф $\left(\frac{\theta-\theta^*}{\Delta\theta}\right)^2$ отражает, что убытки растут быстрее линейного.

Коэффициент жесткости k_θ определяет крутизну падения (0–1).

Обрезка нулем $max(0; \ldots)$ исключает отрицательные значения.

Влияние потерь и разубоживания ($\Psi_{LD}(L, D)$)

$$\Psi_{LD}(L, D) = max\left(0; 1 - a \times \left(\frac{L - L^*}{\Delta L}\right)^2 - b \times \left(\frac{D - D^*}{\Delta D}\right)^2 - c \times \left(\frac{L - D}{\Delta\Delta}\right)^2\right) \quad (3)$$

Теория построения трех слагаемых:

- ущерб от потерь: $a \times \left(\frac{L-L^*}{\Delta L}\right)^2$, где L - фактические потери (доля), L^* - целевой уровень потерь, ΔL - допустимое отклонение, a - вес этого фактора (0.25).

- ущерб от разубоживания: $b \times \left(\frac{D-D^*}{\Delta D}\right)^2$, где D - фактическое разубоживание (доля), D^* - целевой уровень разубоживания, ΔD – допустимое отклонение, b - вес (0.30 больше, чем у a - разубоживание критичнее).

- штраф за разбаланс между потерями и разубоживанием: $c \times \left(\frac{L-D}{\Delta\Delta}\right)^2$, где $(L - D)$ – разность между потерями и разубоживанием, $\Delta\Delta$ - допустимый разбаланс, c – вес (0.15).

Физический смысл: сильная диспропорция между потерями и разубоживанием указывает на системные проблемы технологии. Математическая постановка точка безубыточности $П(\theta, L, D) = 0$. Условия: либо $\Phi_\theta = 0$, либо $\Psi_{LD}(L, D) = 0$.

Решение для угла

$$1 - k_\theta \times \left(\frac{\theta - \theta^*}{\Delta\theta}\right)^2 = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\theta - \theta^*}{\Delta\theta}\right)^2 = \frac{1}{k_\theta} \quad (5)$$

$$\theta = \theta^* \pm \frac{\Delta\theta}{\sqrt{k_\theta}} \quad (6)$$

Решение для потерь/разубоживания. Уравнение $\Psi_{LD}(L, D) = 0$ квадратное относительно L и D. Для L при фиксированном D

$$1 - a \times \left(\frac{L - L^*}{\Delta L}\right)^2 - b \times \left(\frac{D - D^*}{\Delta D}\right)^2 - c \times \left(\frac{L - D}{\Delta\Delta}\right)^2 = 0 \quad (7)$$

приводится к виду $A \times L^2 + B \times L + C = 0$, где

$$A = \frac{a}{\Delta L^2} + \frac{c}{\Delta\Delta^2} \quad (8)$$

$$B = -\frac{2a \times L^*}{\Delta L^2} - \frac{2c \times D}{\Delta\Delta^2} \quad (9)$$

$$C = 1 - a \times \left(\frac{L^*}{\Delta L}\right)^2 - b \times \left(\frac{D - D^*}{\Delta D}\right)^2 - c \times \left(\frac{D}{\Delta\Delta}\right)^2 \quad (10)$$

Ключевым допущением модели является оптимальность данной точки, что обуславливает равенство нулю первых производных (градиента) и позволяет сфокусироваться на матрице Гессе для описания квадратичного штрафа за отклонение от целевых показателей.

Экономико-математическое моделирование прибыли на основе регрессионного анализа с Lasso-регуляризацией.

Далее исследования посвящен разработке регрессионной модели прибыли, которая расширяет базовые представления о зависимостях за счет включения качественных характеристик руды и использования современных методов машинного обучения. В отличие от классических подходов, здесь формируется расширенная полиномиальная модель второго порядка, интегрирующая не только угол падения (θ) , потери (L) и разубоживание (D), но и такие специфические для Жезказганского месторождения параметры, как балансовые запасы (Q), содержание меди (M) и коэффициент извлечения (ξ). Для обеспечения математической устойчивости модели в условиях ограниченной выборки применяется Lasso-регрессия (L1-регуляризация), которая автоматически отсеивает малозначимые факторы и устраняет мультиколлинеарность между полиномиальными членами [10-12].

На первом этапе формируется полиномиальная регрессионная модель второго порядка, описывающая зависимость прибыли от геолого-технологических параметров отработки:

$$\Pi = \beta_0 + \beta_1\theta + \beta_2 L + \beta_3 D + \beta_4 S + \beta_5\theta^2 + \beta_6 L^2 + \beta_7 D^2 + \beta_8\theta L + \beta_9\theta D + \beta_{10} LD + \beta_{11}\theta S + \beta_{12} LS + \beta_{13} DS + \epsilon \quad (11)$$

где, Π - прибыль, USD ($);

θ - угол падения залежи, градусы;

L - потери полезного ископаемого (доли);

D - разубоживание (доли);

S - сдвиг (0 - отсутствует, 1 - присутствует);

β_i - параметры регрессионной модели;

ϵ - случайная ошибка (ошибка модели).

Для Жезказганского меднорудного месторождения прибыль формируется не только геометрией и потерями, но и качественными характеристикам руды и запасов. В связи с этим модель расширяется следующими параметрами:

Q_{bal} - балансовые запасы, т;

c_{Cu} - среднее содержание меди, доли или %;

ξ - коэффициент сквозного извлечения.

Расширенная регрессионная модель принимает вид:

$$\Pi = \beta_0 + \beta_1\theta + \beta_2 L + \beta_3 D + \beta_4 S + \beta_5 Q_{bal} + \beta_6 c_{Cu} + \beta_7 \xi + \beta_8\theta^2 + \beta_9 L^2 + \beta_{10} D^2 + \beta_{11}\theta L + \beta_{12}\theta D + \beta_{13} LD + \beta_{14}\theta S + \epsilon \quad (12)$$

Для обеспечения устойчивости оценок и корректной интерпретации коэффициентов выполняются следующие операции:

1. Перевод процентных показателей L и D в доли.

2. Стандартизация всех числовых признаков: $z_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}$.

3. Разделение выборки на обучающую (80%) и тестовую (20%).

Для оценки коэффициентов применяется Lasso-регрессия, минимизирующая функционал:

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\Pi_i - \hat{\Pi}_i\right)^2 + \lambda \sum_j |\beta_j| \quad (13)$$

Использование Lasso позволяет: автоматически отбирать значимые линейные, квадратичные и перекрёстные члены; устранить мультиколлинеарность, возникающую при полиномиальном расширении; получить компактную и интерпретируемую модель прибыли.

После стандартизации признаков и применения Lasso-регрессии для Жезказганского месторождения была получена следующая модель прибыли:

$$\widetilde{\Pi} = \beta_0 - 0.62\widetilde{L} - 0.48\widetilde{D} + 0.21\tilde{\theta} - 0.31\widetilde{L}^2 - 0.27\widetilde{D}^2 + 0.18\tilde{\theta}^2 - 0.35\widetilde{L}\widetilde{D} + 0.16\tilde{\theta} - 0.12\tilde{\theta}S \quad (14)$$

где, тильда обозначает стандартизированные переменные. Это адаптированная модель именно для Жезказганского месторождения.

Результаты и обсуждение. Анализ диапазонов входных данных позволяет определить операционное окно рентабельности и установить границы чувствительности модели к внешним и технологическим факторам. В контексте геомеханических условий Жезказганского месторождения исследуемый диапазон углов падения охватывает значения от 30^0 до 51^0, при этом наиболее благоприятным и экономически эффективным признан интервал от 300 до 45^0. Для технологических параметров установлены вариативные границы: потери руды (L) варьируются в пределах 19–30%, что определяет допустимое отклонение D-L на уровне 0.06 (или половину амплитуды диапазона), в то время как разубоживание (D) демонстрирует более широкую область значений от 23% до 38% с расчетным допуском D = 0.08. Подобная дифференциация допусков математически обосновывает различную степень влияния каждого фактора на итоговую прибыль, подтверждая, что стабильность системы в большей степени зависит от контроля показателей разубоживания.

Более высокий вес разубоживания (0.30 против 0.25 у потерь) математически подтверждает, что для условий Жезказгана засорение руды пустой породой является более критичным фактором, чем недовыемка запасов. Для адаптации модели к условиям Жезказганского месторождения использованы эмпирические данные, согласно которым базовая прибыль составляет 1.15×10^6, а целевые уровни потерь и разубоживания установлены на отметках 22% и 27% соответственно. Анализ модели позволяет аналитически определять точки безубыточности через решение квадратных уравнений относительно каждого фактора.

Предложенная методология аппроксимации 2-го порядка позволяет не только визуализировать «поверхности отклика» прибыли в 3D-пространстве, но и количественно оценить системные риски технологии через штраф за разбаланс (L−D). Это обеспечивает инженерно-технический персонал инструментом для опера-

тивной корректировки планов горных работ с целью удержания параметров в «куполе рентабельности», ограниченном допустимыми отклонениями по потерям (±6%) и разубоживанию (±8%).

На основе разработанной математической модели (рисунок 4) и установленных калибровочных параметров, представленный рисунок визуализирует комплексную зависимость прибыли Жезказганского месторождения от ключевых факторов отработки. Центральное место в анализе занимает базовая прибыль, которая при оптимальных условиях достигает максимума в размере около $1.15x10^6$. Графики наглядно демонстрируют квадратичный характер функции прибыли: любое отклонение от целевых значений угла падения (θ = 30^0), потерь (L = 22%) или разубоживания (D = 27%) ведет к параболическому снижению финансового результата.

Особое внимание уделено влиянию геометрии залежи и критическим порогам эксплуатации. Моделирование показывает, что при достижении критического угла падения в 60.0° прибыль полностью нивелируется квадратичным штрафом, независимо от уровня технологических потерь. Аналогично, графики «Прибыль vs Разубоживание» фиксируют точку безубыточности на отметке 31.3%, подтверждая заложенный в модель более высокий вес штрафа за разубоживание (Ψ_D = 0.30) по сравнению с потерями (Ψ_L = 0.25). Это подчеркивает, что для экономики Жезказгана чистота добываемой руды является более значимым фактором, чем полнота извлечения запасов.

Анализ системной устойчивости технологии отражен на графике зависимости прибыли от разбаланса (L-D). В сочетании с представленными поверхностями отклика, которые при увеличении угла до 50^0–51^0 практически полностью уходят в область отрицательных значений, поэтому максимальный угол падения рекомендуется до 45^0 в заданных горно-геологических условиях (рис 5–6).

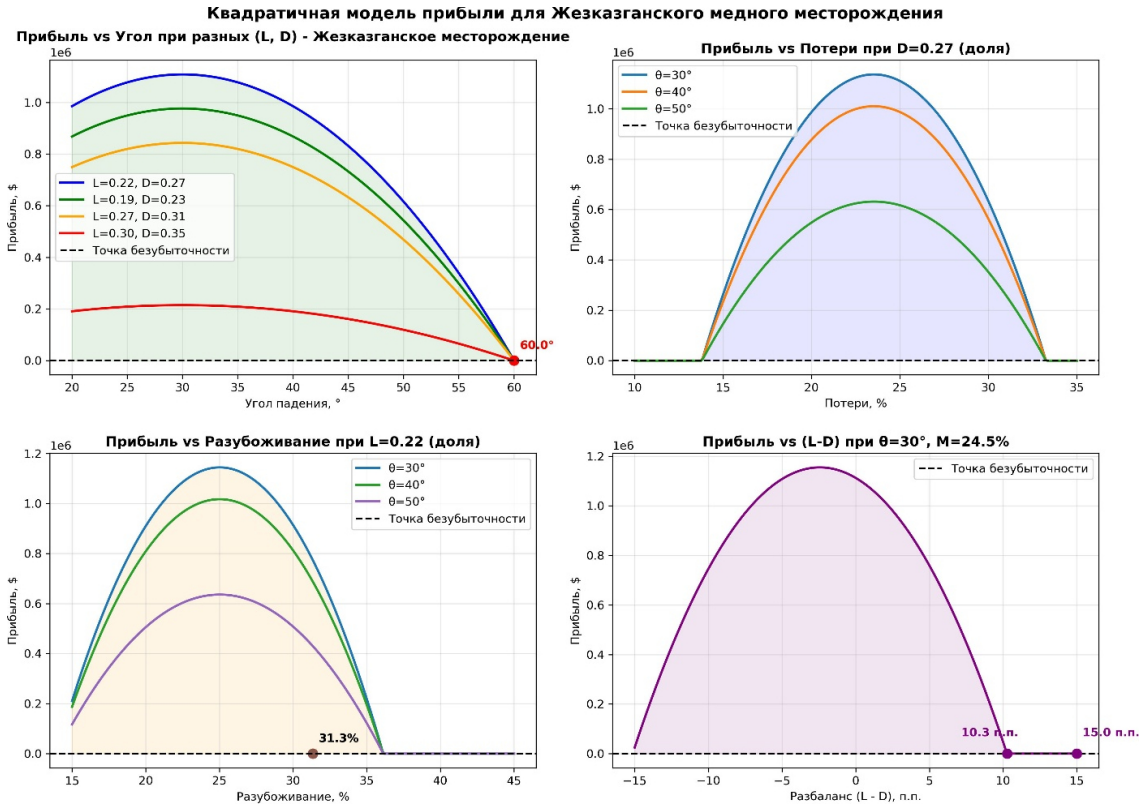


Рис.4 - Результаты многофакторного квадратичного моделирования прибыли для условий Жезказганского месторождения

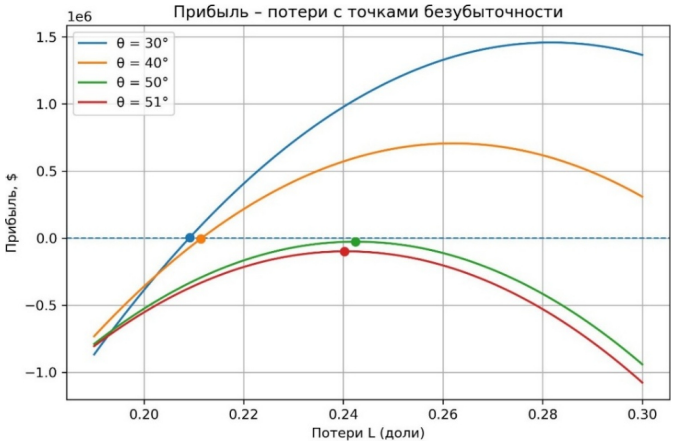


Рис.5 - Результаты математического моделирования в зависимости прибыли от уровня потерь рудного тела с фиксацией точек безубыточности

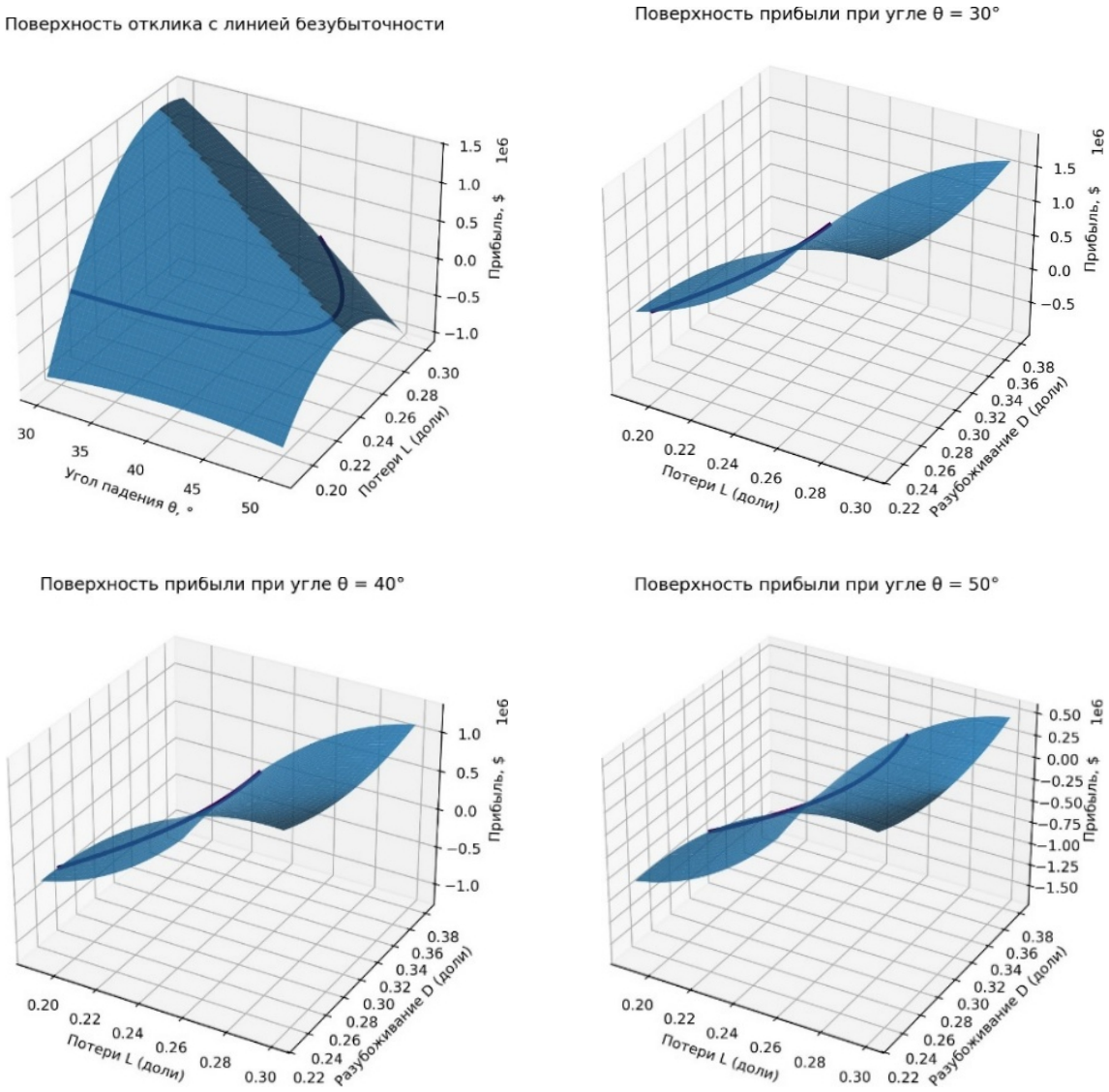


Рис.6 - 3D экономическая-математическая модель области рентабельности отработки при угле наклона залежи

Выводы. Научная новизна данного метода заключается в использовании стандартизированной формы уравнения прибыли, что позволяет корректно сопоставлять влияние разнородных факторов (градусов, тонн и процентов). Полученная модель фиксирует, что наибольшее деструктивное воздействие на финансовый результат оказывают потери и разубоживание, причем их влияние носит ярко выраженный нелинейный характер, усиливающийся при определенных комбинациях геометрических параметров. Фактор тектонического сдвига модели выступает как модификатор чувствительности, изменяющий реакцию прибыли на изменение угла залегания, что полностью соответствует геологическим реалиям Жезказганского региона.

Интерпретация результатов регрессионного моделирования подтверждает выводы визуального анализа поверхностей отклика: при малых значениях потерь влияние угла падения проявляется умеренно, однако по мере роста технологических отклонений чувствительность системы к геометрии залежи резко возрастает. Использование регуляризации позволило получить компактную и интерпретируемую формулу, которая служит надежным инструментом для проведения анализа чувствительности и поиска оптимальных стратегий отработки месторождения в условиях высокой неопределенности.

Представленные графические зависимости иллюстрируют нелинейный характер изменения прибыли в функции от коэффициента потерь рудного тела при варьировании угла падения залежи. Математические модели описываются семейством вогнутых кривых (парабол), что свидетельствует о наличии экстремума оптимального уровня технологических потерь, при котором достигается максимальный финансовый результат. С ростом угла наблюдается выраженная деградация доходности: кривые смещаются в область отрицательных значений, а амплитуда максимальной прибыли существенно сокращается, что объясняется усложнением условий отработки и ростом удельных затрат.

Расчеты показали, что при увеличении ценности руды оптимум прибыли смещается в сторону снижения ущерба от потерь и разубоживания руды.

Маркированные точки на графике определяют критические значения коэффициента потерь, разделяющие области рентабельной и убыточной добычи. Для пологих залежей точка безубыточности достигается при минимальных значениях потерь (L в приделах 0,21), обеспечивая широкий диапазон эффективной эксплуатации. Однако при увеличении угла наклона от 50^0 область рентабельности сужается до критического минимума, смещаясь в сторону более высоких значений потерь. Это указывает на то, что для крутопадающих тел поддержание низкого уровня потерь становится экономически нецелесообразным из-за опережающего роста эксплуатационных расходов. По данному методу также максимальный угол падения рекомендуется до 45^0 в заданных горно-геологических условиях.

Литература

1. Гельманова З. С., Базаров Б. А., Мезенцева А. В., Конакбаева А. Н., Толешов А.К. Управление производственной безопасностью на горнодобывающих предприятиях Казахстана. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2017. 124 с.

2. Каспарьян Э.В., Кузнецов А. А. Геомеханика: учебник для вузвузов. -Москва: Юрайт- 2023. - 245 с. ISBN 978-5-86185-901-1

3. Бекбергенов Д.К., Савич И. Н., Зейнуллин А.А. Технологическое решение для подземного освоения нетронутых залежей, оставленных в зоне обрушения Жезказганского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2025. - № 6 (спецвыпуск 10). – 20 с.

4. Крыкпышев Б. Проблемы и пути инновационного развития горной промышленности: презентационный доклад // IV международная научно-практическая конференция «Геотехника-2013». -

Алматы, 2013.

5. Бекбергенов Д. К. Итоговый отчет по теме НИР «Исследование соответствия определения параметров и системы разработки в условиях шахты „Анненская“ Восточно-Жезказганского рудника». – Алматы: ТОО «КазНИИЦветмет», 2022. - 347 с.

6. Бекбергенов Д.К., Зейнуллин А.А. Развитие технологии повторной добычи руды из междукамерных целиков, оставленных в зонах обрушения на завершающей стадии отработки Жезказганского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2 (спецвыпуск 4). – 20 с.

7. Demin V., Kalinin A., Tomilova N., Tomilov A., Akpanbayeva A., Shokarev D., Popov A., Advanced digital modeling of stress–strain behavior in rock masses to ensure stability of underground mine workings//Civil Engineering Journal. - 2025.-Vol.11(3). -P.1072-1087. DOI 10.28991/CEJ-2025-011-03-014.

8. Аханов Т. М. Создание высокоэффективных технологий разработки месторождений в условиях подземных рудников ТОО «Корпорация Казахмыс» // Горный журнал Казахстана. - 2009. - № 11. - С.26–30.

9. Герасименко В. И., Макаров А. Б., Зотеев О. В. Анализ геомеханического состояния выработанных пространств Жезказганского месторождения. Часть 1. - Караганда - Жезказган: ГГУ ТОО «Корпорация Казахмыс», 2010. - 52 с.

10. Низамова Г. З., Гайфуллина М. М. Корреляционно-регрессионный анализ эффективности использования инвестиционных ресурсов нефтяной компании // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономические науки. - 2021. - Т.9(3).-С.27-38 DOI 10.26425/2309-3633-2021-9-3-27-38.

11. Самсонов А. В., Васильев И. В. Анализ инвестиционной привлекательности предприятий нефтегазовой отрасли в России // Московский экономический журнал. – 2020. - № 2. - С.439–450. DOI 10.24411/2413-046x-2020-10088.

12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. - 2nd ed. - New York: Springer. - 2009. - 745 p.

References

1. Gel’ manova Z. S., Bazarov B. A., Mezenceva A. V., Konakbaeva A. N., Toleshov A.K. Upravlenie proizvodstvennoj bezopasnost’ ju na gornodobyvajushhih predprijatijah Kazahstana. Karaganda: Izd-vo KarGTU, 2017.124 s. [in Russian]

2. Kaspar’ jan Je.V., Kuznecov A. A. Geomehanika: uchebnik dlja vuzov. - Moskva: Jurajt- 2023. - 245 s. ISBN 978-5-86185-901-1. [in Russian]

3. Bekbergenov D.K., Savich I. N., Zejnullin A.A. Tehnologicheskoe reshenie dlja podzemnogo osvoenija netronutyh zalezhej, ostavlennyh v zone obrushenija Zhezkazganskogo mestorozhdenija // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten’. - 2025. - № 6 (specvypusk 10). - 20 s. [in Russian]

4. Krykpyshev B. Problemy i puti innovacionnogo razvitija gornoj promyshlennosti: prezentacionnyj doklad // IV mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija «Geotehnika-2013». - Almaty, 2013. [in Russian]

5. Bekbergenov D. K. Itogovyj otchet po teme NIR «Issledovanie sootvetstvija opredelenija parametrov i sistemy razrabotki v uslovijah shahty „Annenskaja“ Vostochno-Zhezkazganskogo rudnika». - Almaty: TOO «KazNIICvetmet», 2022. - 347 s. [in Russian]

6. Bekbergenov D.K., Zejnullin A.A. Razvitie tehnologii povtornoj dobychi rudy iz mezhdukamernyh celikov, ostavlennyh v zonah obrushenija na zavershajushhej stadii otrabotki Zhezkazganskogo mestorozhdenija // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. - 2025. - № 2 (specvypusk 4). - 20 s. [in Russian]

7. Demin V., Kalinin A., Tomilova N., Tomilov A., Akpanbayeva A., Shokarev D., Popov A., Advanced digital modeling of stress–strain behavior in rock masses to ensure stability of underground mine workings//Civil Engineering Journal. - 2025.-Vol.11(3). -P.1072-1087. DOI 10.28991/CEJ-2025-011-03-014.

8. Ahanov T. M. Sozdanie vysokojeffektivnyh tehnologij razrabotki mestorozhdenij v uslovijah podzemnyh rudnikov TOO «Korporacija Kazahmys» // Gornyj zhurnal Kazahstana. - 2009. - № 11. - S.26–30. [in Russian]

9. Gerasimenko V. I., Makarov A. B., Zoteev O. V. Analiz geomehanicheskogo sostojanija vyrabotannyh prostranstv Zhezkazganskogo mestorozhdenija. Chast' 1. - Karaganda - Zhezkazgan: GGU TOO «Korporacija Kazahmys, 2010. - 52 s. [in Russian]

10. Nizamova G. Z., Gajfullina M. M. Korreljacionno-regressionnyj analiz jeffektivnosti ispol' zovanija investicionnyh resursov neftjanoj kompanii // Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovanie, jekonomika. Serija: Jekonomicheskie nauki. - 2021. - T.9(3). -C.27-38 DOI 10.26425/2309-3633-2021-9-3-27-38. [in Russian]

11. Samsonov A. V., Vasil' ev I. V. Analiz investicionnoj privlekatel' nosti predprijatij neftegazovoj otrasli v Rossii // Moskovskij jekonomicheskij zhurnal. – 2020. - № 2. - S. 439-450. DOI 10.24411/2413-046x-2020-10088. [in Russian]

12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. - 2nd ed. - New York: Springer. - 2009. - 745 p.

Сведения об авторах

Бекбергенов Д.К.- кандидат технических наук, Институт горного дела им. Д.А.Кунаева, Алматы, Казахстан, e-mail: kdbekbergen@mail.ru;

Савич И. Н.- доктор технических наук, профессор, НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: tpr_msmu@mail.ru;

Зейнуллин А.А.- доктор технических наук, профессор, АО «Казахский университет технологии и бизнеса и-м.К.Кулажанова», Астана, Казахстан, e-mail: karim_57@mail.ru;

Бимурат Ж.- PhD, Институт горного дела им. Д.А.Кунаева, Алматы, Казахстан, e-mail: zhbimurat@igd,com,kz;

Жанакова Р.К.- PhD ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: zhanakova_raisa@mail.ru.

Information about the author

Bekbergenov D.K. - candidate of technical sciences, D.A. Kunaev Institute of Mining, Almaty, Kazakhstan, e-mail: kdbekbergen@mail.ru;

Savich I.N. - Doctor of Technical Sciences, Professor, NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: tpr_msmu@mail.ru;

Zeinullin A.A. - Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC « K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business », Astana, Kazakhstan, e-mail: karim_57@mail.ru;

Zhanar Вю - PhD, D.A. Kunaev Institute of Mining, Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhbimurat@igd,com,kz;

Zhanakova R.K.- PhD Assoc. professor, K. I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhanakova_raisa@mail.ru.

ҒТАМР 52.31.01 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1373**

ТАУ-КЕН ЖҰМЫСТАРЫНДАҒЫ ҚАЗУ ЖӘНЕ ТИЕУ ҮРДІСТЕРІНДЕ ЦИФРЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ ҚОЛДАНУ

[1]А.А. Орынбай, [1]Т.С. Ибырханов✉, [2]Е.О. Исабаев, [3]А.И. Ибырханова

[1]К.И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан,
[2]"Tarbagatai Keni" LLP, Астана, Қазақстан,
[3]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

✉ *Корреспондент-автор: ibir.tem@mail.ru*

Қазіргі уақытта біздің еліміздің тау кен өнеркәсібі жасанды интеллект сияқты заманауи технологиялардың дамуы мен тау кен жұмыстарындағы автоматтандырылған өндірістік процестерге енгізілуіне байланысты трансформациялық өзгерістерге ұшырауда. Бұл мақалада тау кен өндіру саласында заманауи цифрлық шешімдерді қолдану мәселелері, сондай ақ олардың экономикалық тиімділігі «Алтыналмас» АҚ кен орны және Қазақстан Республикасының басқа да пайдалы қазбалар кен орындары мысалында талданады.

2025 жылы Қазақстан Республикасының Президенті Қасым-Жомарт Тоқаевтың ел халқына Жолдауы «Қазақстан жасанды интеллект дәуірінде: негізгі сын қатерлер және оларды цифрлық трансформация арқылы шешу жолдары» деген атпен ұсынылды [1].

Мемлекет басшысы таяу жылдары Қазақстанда толыққанды цифрлық мемлекет құрудың стратегиялық мақсатын белгіледі. Бұл міндетті іске асыру еліміздің барлық тау кен өндіру саласын қоса алғанда, экономиканың барлық секторларында еңбек өнімділігінің тиімділігін және өнеркәсіптік қауіпсіздік деңгейін арттыруға бағытталған зияткерлік жүйелер мен цифрлық технологияларды ауқымды енгізуді көздейді.

Жасанды интеллект технологияларын қолдану қауіпті, күрделі және уақытты қажет ететін өндірістік процестерді жеңілдетуге ықпал етеді, олардың қауіпсіздігі мен кен орындарында ашық тау кен жұмыстары кезінде пайдалы компонентті жоғалтпай қазудың экономикалық тиімділігін арттырады. Мансапты цифрландыру «Индустрия 4.0» және "ақылды мансап" ұғымдарының негізгі элементіне айналады, бұл басқарудың дәстүрлі әдістерінен деректерге негізделген ақылды шешім қабылдау жүйелеріне көшуді қамтамасыз етеді [2].

Ашық тау кен жұмыстарын цифрландырудың негізгі бағыттарының бірі геоақпараттық жүйелерді (ГАЖ) және кен орындарының цифрлық модельдерін (цифрлық егіз) қолдану болып табылады.3D геологиялық және тау кен техникалық модельдеуді қолдану тау кен жұмыстарын жоспарлаудың дәлдігін арттыруға, кертпелердің, карьерлердің және көлік схемаларының параметрлерін оңтайландыруға, сондай ақ геологиялық ақпараттың белгісіздігімен байланысты тәуекелдерді азайтуға мүмкіндік береді. ГАЖ өндірістік деректермен интеграциялау тау кен жұмыстарының орындалуын және жобалық шешімдерден ауытқуларды жедел бақылауды қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: кен орын; пайдалы қазба, сапа басқару жүйесі, машиналық көру, жасанды интеллект, тауар өнімінің сапасы, гранқұрам, жер қойнауын ұтымды және кешенді игеру, тау кен өнеркәсібі.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ВЫЕМОЧНО ПОГРУЗОЧНЫХ ПРОЦЕССАХ НА ГОРНЫХ РАБОТАХ

[1]А.А. Орынбай, [1]Т.С. Ибырханов✉, [2]Е.О. Исабаев, [3]А.И. Ибырханова

[1]НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева», Алматы, Казахстан,
[2]ТОО «Тарбагатай кени», Астана, Казахстан,

[3]*Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан,*
e-mail: ibir.tem@mail.ru

В настоящее время горнодобывающая промышленность нашей страны переживает значительные трансформационные изменения, обусловленные развитием и внедрением современных технологий, таких как искусственный интеллект (ИИ) в автоматизированные производственные процессы в добычных горных работах. В данной статье анализируются вопросы применения современных цифровых решений в горнодобывающей отрасли, а также их экономическая эффективность на примере месторождении АО «Алтыналмас» и др. месторождениях полезных ископаемых Республики Казахстан.

В 2025 году послание президента Республики Казахстана Касым-Жомарта Токаева народу страны было представлено под названием «*Казахстан в эпоху искусственного интеллекта: ключевые вызовы и пути их решения через цифровую трансформацию*» [1].

Глава государства обозначил стратегическую цель для нас в ближайшие годы сформировать в Казахстане полноценное цифровое государство. Реализация данной задачи предполагает масштабное внедрение интеллектуальных систем и цифровых технологий, направленных на повышение эффективности производительности труда и уровня промышленной безопасности во всех секторах экономики, включая всю горнодобывающую отрасль нашей страны.

Использование технологий ИИ способствует упрощению опасных, сложных и трудоемких производственных процессов, повышая их безопасность и экономическую эффективность выемки без потерь полезного компонента при открытых горных работах на месторождениях. Цифровизация карьеров становится ключевым элементом концепций «Индустрия 4.0» и «умный карьер», обеспечивая переход от традиционных методов управления к интеллектуальным системам принятия решений на основе данных [2].

Одним из основных направлений цифровизации открытых горных работ является применение геоинформационных систем (ГИС) и цифровых моделей месторождений. Использование 3D геологического и горнотехнического моделирования позволяет повысить точность планирования горных работ, оптимизировать параметры уступов, бортов карьеров и транспортных схем, а также снизить риски, связанные с неопределенностью геологической информации. Интеграция ГИС с производственными данными обеспечивает оперативный контроль выполнения горных работ и отклонений от проектных решений.

Ключевые слова: месторождение, полезное ископаемое, система управления качеством, машинное зрение, искусственный интеллект, качество товарной продукции, грансостав, рациональное и комплексное освоение недр, горнодобывающая промышленность.

THE USE OF MODERN DIGITAL TECHNOLOGY IN MINING AND LOADING PROCESSES.

[1]A.A. Orynbay, [1]T.S. Ibyrkhanov✉, [2]E.O. Isabaev, [3]A.I. Ibyrkhanova

[1]*NJSC « K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University» Almaty, Kazakhstan,*
[2]*LLP «Tarbagatai keni» Astana, Kazakhstan,*
[3]*Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,*
e-mail: ibir.tem@mail.ru

Currently the mining industry in our country is undergoing significant transformational changes due to the development and implementation of modern technologies such as artificial intelligence (AI) in automated production processes in mining operations. This article analyzes the issues of using modern digital solutions in the mining industry, as well as their economic efficiency using the example of the Joint Stock Company Altynalmas deposit and other mineral deposits in the Republic of Kazakhstan.

In 2025 the message of the President of the Republic of Kazakhstan Kassym-Jomart Tokayev to the

people of the country was presented under the title *«Kazakhstan in the era of artificial intelligence: key challenges and ways to solve them through digital transformation»* [1].

The Head of State outlined a strategic goal for us to form a full-fledged digital state in Kazakhstan in the coming years. The implementation of this task involves the large-scale implementation of intelligent systems and digital technologies aimed at improving labor productivity and industrial safety in all sectors of the economy, including the entire mining industry of our country.

The use of AI technologies helps simplify dangerous, complex and time consuming production processes, increasing their safety and economic efficiency of excavation without loss of a useful component during open pit mining operations. Digitalization of careers is becoming a key element of the concepts of «Industry 4.0» and «smart career», ensuring the transition from traditional management methods to intelligent data-based decision-making systems [2].

One of the main directions of digitalization of open pit mining is the use of geographic information systems (GIS) and digital models of deposits (digital twin). The use of 3D geological and mining engineering modeling makes it possible to increase the accuracy of mining planning, optimize the parameters of ledges, sides of quarries and transport schemes, as well as reduce the risks associated with the uncertainty of geological information. The integration of GIS with production data ensures operational control of mining operations and deviations from design decisions.

Keywords: deposit, mineral resource, quality management system, machine vision; artificial intelligence, quality of marketable products, grant composition, rational and integrated development of mineral resources, mining industry.

Кіріспе. Қазақстан Республикасының индустриялық қаңқасының сенімді тірегінің бірі дәстүрлі түрде тау кен металлургия кешені болып табылады.

Елімізде тау кен өндіру саласы даму барысында бірқатар елеулі технологиялық өзгерістерден өтті.

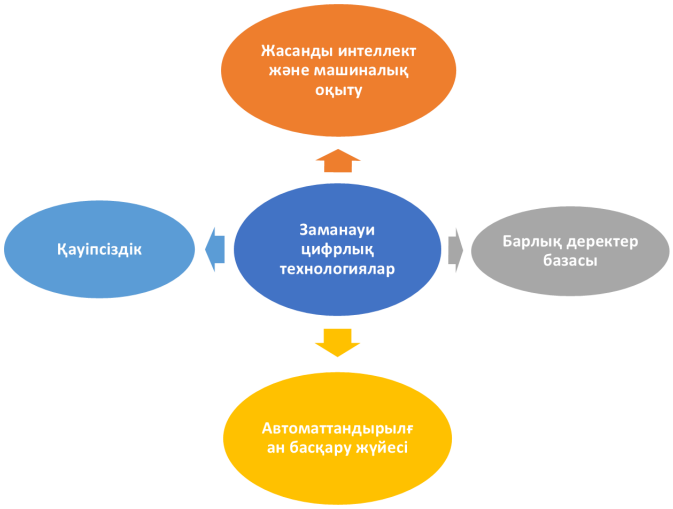
Әлемдік деңгейдегі көрнекті ғалым, КСРО ҒА академигі Қаныш Имантайұлы Сәтбаевтың басшылығымен жұмыс істеген ғалымдар, геологтар қызметінің арқасында өткен ғасырда Қазақстан Республикасының аумағында 100-ден астам ірі және орта, сондай-ақ 500-ден астам қатардағы пайдалы қазбалар кен орындары ашылып, мемлекеттік есепке қойылды. Жүргізілген геологиялық барлау жұмыстарының нәтижесінде Қазақстан Республикасы ірі тау кен өндіруші мемдекет елдердің бірі ретінде қалыптасты [2].

Жақында тау кен өнеркәсібіндегі жаңа революция біздің еліміздің саласына әсер ете бастады. Тау кен өнеркәсібін цифрландыру бұл ең жаңа шекара, тау кен технологиясының локомотиві болып саналады. Әр түрлі спектрдегі тапсырмаларды нақты орындай алатын байланыс және сымсыз жүйелерді жақсарту үшін зерттеулер мен әзірлемелер жүргізілуде.

Тау кен жұмыстарының цифрлық трансформациясы өнеркәсібтің перспективті бағыттарының біріне айналды [3-5].

Жоғары бәсекелестікте экологиялық талаптар мен өнеркәсіптік қауіпсіздік стандарттардың қатаңдалуымен, сондай ақ шығындарды азайта отырып, өнімділікті арттыру қажеттілігімен сипатталатын қазіргі әлемдік нарық жағдайында, өндірістік процестерді автоматтандырылуы, пайдалы қазбалар кен орындары қызметінің тиімділігін бейімдеу мен арттырудың маңызды құралы болып табылады [6,7]. Жасанды интеллекті енгізумен заманауи ”ақылды камера” техникалық байқауы тау-кен өнеркәсібіндегі негізгі цифрлық технологиялардың бірі болып саналады 1 суреттегі.

Жасанды интеллект пен автоматтандырылған басқару жүйесінің (АБЖ) енгізілуі өндірістік процестерді оңтайландыруға, қауіпсіздік деңгейін арттыруға, пайдалану шығындарын азайтуға және компаниялардың бәсекелестік позицияларын нығайтуға кең мүмкіндіктер ашады.



1-сурет. Таукен өндіру өнеркәсібіндегі цифрлық технологиялар

Тау кен өнеркәсібін дамытудың қазіргі кезеңі қуаттылықтың кең көлемде өсуінен толық деректер базасын жүргізу арқылы терең технологиялық оңтайландыруға көшумен сипатталады. Қазу тиеу жұмыстары пайдалы қазбалар кен орнының пайдалану шығындарының 40-60% дейін тиесілі құн тізбегіндегі негізгі буын болып табылады [8-9].

Ғалымдардың қазіргі заманғы зерттеулерінің барлығы дерлік ашық карьерлердегі тау кен массасын қазу және тиеу процестері дәстүрлі түрде тау кен өндірісіндегі ең көп уақытты қажет ететін және қауіпті операциялардың бірі болып қала беретінін атап көрсетеді. Бұл процестер айтарлықтай күрделі механикалық жүктемелер мен жабдықтардың тозуы жағдайында адамның белсенді қатысуын талап етеді.

Тау кен өнеркәсібінің көптеген халықаралық сарапшылары мұндай кезеңдердегі автоматтандырудың төмен деңгейі екі маңызды салдары бар екенін атап өтті:

- өнімділіктің шектелуі: автоматтандыру деңгейінің жеткіліксіздігі тиімді өнімділікті айтарлықтай шектейді;

- қауіпсіздікті арту: физика техникалық жағдайлардың күрделілігі, тау жыныстарының геомеханикалық сипаттамаларының әртүрлілігі және карьерлердегі технологиялық жағдайдың үнемі өзгеруі жұмыс орындарындағы тәуекелдердің ықтималдығын арттырады.

Осы мәселелерді шешу үшін қазіргі заманғы цифрлық технологиялар мен трансформация процестерін енгізу қажет. Бұл контексте біздің түпкі мақсатымыз сандық тау кен кәсіпорнын құру. Мұндай кәсіпорын келесі мүмкіндіктерді қамтамасыз ете алады:

- процестерді автоматтандыру және цифрлық басқару арқылы өнімділікті арттыру;

- қашықтықтан бақылау және автоматтандырылған жүйелерді қолдану арқылы еңбек қауіпсіздігін жақсарту;

- нақты уақыт режимінде деректерді жинау және талдау арқылы шешімдердің дәлдігін жоғарылату;

- жабдықтың тозуын азайту жәнге оның жұмыс мерзімін ұзарту;

- геомеханикалық жағдайлар мен технологиялық параметрлерді үнемі бақылау арқылы тәуекелдерді азайту.

Осылайша, сандық тау кен кәсіпорнын құру бұл тау кен өндірісінің тиімділігі мен қауіпсіздігін арттырудың негізгі жолы, ол дәстүрлі әдістердің шектеулерін жеңуге мүмкіндік береді.

Тау кен кешенін толық басқару жүйелері цифрлық кәсіпорынның негізгі орталық буыны болып табылады. Аталған жүйелер ашық тау кен жұмыстары шеңберінде қолданылатын барлық цифрлық жүйелерді интеграциялап, кен

орындарындағы тау кен өндірісінің тиімділігін арттыруды және өндірістік қауіпсіздіктің жоғары деңгейін қамтамасыз етуді көздейді [9-13].

Материалдар мен әдістер. Геоақпараттық жүйелер және цифрлық модельдер пайдалы қазбалар кен орындарының ашық тау кен жұмыстарын кеңістіктік талдау мен жоспарлаудың негізі болып табылады. Карьерлердің 3D модельдерін пайдалы компонентті жоғалтпай қазба көлемін дәлірек анықтауға, блоктардың жиектер параметрлерін және тау массасының дурыс қозғалу схемасын оңтайландыруға мүмкіндік береді. Сандық егіз геологиялық, технологиялық және өндірістік ақпаратты біріктіреді, басқарушылық шешімдер қабылдауға қолдау көрсетеді және тау кен жұмыстарының орындалуына жедел бақылау жасайды 2 сурет.

Цифрлық егіз жүйесін жобалау немесе әзірлеу кезінде еңбек қауіпсіздігін, сенімділікті және табыстылықты арттыруды қамтамасыз ететін заманауи шешім қабылдаушы ретінде анықтауға болады [14,15].

Тау кен жұмыстарында жасанды интеллект пен машиналық көруді қолдану түбегейлі арттыра алады. Жасанды интеллект қазу тиеу процестерін цифрландырудың негізгі құралдарының бірі болып табылады. Қазіргі машиналық оқыту алгоритмдері өндірістік деректерді талдау, жабдықтың техникалық күйін болжау және оның жұмыс режимдерін оңтайландыру үшін қолданылады. Машиналық көру жүйесін енгізу тау массасының гранулометриялық құрамын автоматты түрде анықтауға, тиеу сапасын бақылауға және кен ағынына бөгде қосындылардың түсуіне жол бермеуге мүмкіндік береді. Бұл әсіресе тауарлық өнімнің сапа параметрлерін қатаң сақтауды қажет ететін пайдалы қазбаларды өндіруде өте маңызды.



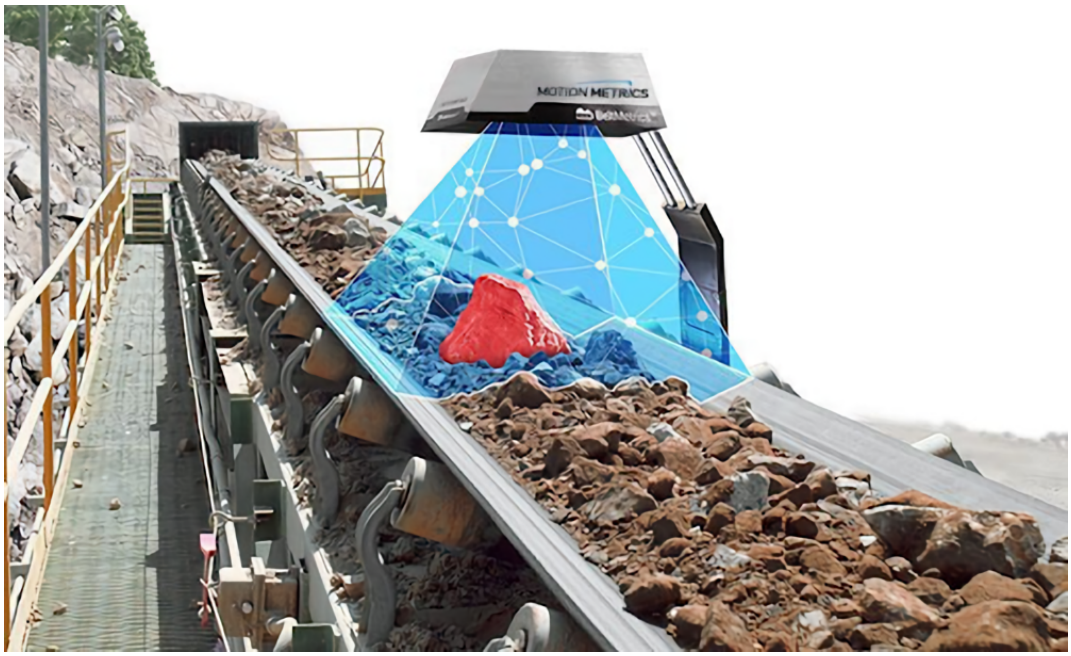
2-сурет. Геоақпараттық жүйелер

«Цифрлық кен орны» бағдарламасын алғашқылардың бірі болып іске қосқан «Алтыналмас» АҚ алтын өндіруші компаниясы ZIIot платформасы «MES» негізінде кен орындарында енгізді. Отандық интеграциялық платформалар тау кен кәсіпорындарына жасанды интеллект енгізумен цифрлық егіз негізінде қазу тиеу жұмыстарын басқарудың кешенді автоматтандырылған жоғары жылдамдықты интеграцияланған жүйесін құруға мүмкіндік берді және оны гетерогенді қолданбалы бағдарламадан барлық қажетті деректермен толтыруды қамтама-

сыз етеді. Барлық статистика мен аналитика жауапты тұлғалар мен басшыларға мобильді құрылғыларға жіберіледі. Сонымен қатар, басшылық интернет байланысы бар әлемнің кез келген нүктесінен фабрикада барлық жүргізіп отырған жұмыстың нақты жағдайын бақылай алады. Ішкі құжат айналымы да цифрлық форматқа көшті, бұл күнделікті қағаз процестерін жеңілдетіп, адам факторнын жойып тастады.

Кәсіпорындарда электрондық цифрлық қолтаңбаларды пайдалана отырып, ауысымдық тапсырмаларды басқарудың автоматтандырылған жүйесі орналастырылды. «Цифрлық кен орны» бағдарламасы аясында барлығы 15-20 ға жуық жобаны орындау қажет. Іске асырылғандардың бірі шөлді және Ақсу-2 алтын кен карьерлеріндегі автопаркті автоматтандырылған басқару. Сонымен қатар, кен орындарында самосвалдар үшін де, басқа карьерлік техникалар үшін де позициялау жүйелері бар: экскаваторлар, бульдозерлер, және грейдерлер. Сондай ақ, «Алтыналмас» АҚ шахтадан фабрикаға тұжырымдамасын дамытып жатқанын айта кеткен жөн. Бұл қиындықтарды іздеу және әртүрлі технологиялық процестерді оңтайландыру үшін өндіріске кешенді тәсіл. Компанияның мәліметінше, ол әлемдік тәжірибеге жүгінген және M2M енгізген алғашқы жер қойнауын пайдаланушы болды. Алтын өндіруші гранқұрамын бақылау үшін жасанды интеллект енгізу арқылы кендердің габаритті емес шығымдылығын азайта алды.

Тау кен массасын қазу және тиеу қол еңбегінің жоғары үлесімен, тау кен жабдықтарына айтарлықтай жүктememен және қызметкерлер үшін жоғары тәуекелдермен сипатталады. Цифрлық 3D технологияларды қолдану автоматтандыру, бақылау және интеллектуалды басқару арқылы осы процестердің ұйымдастырылуын айтарлықтай өзгертуге мүмкіндік береді. Заманауи цифрлық шешімдер экскаваторлардың, тиегіштердің және қосалқы техниканың жұмыс параметрлерін оңтайландыруға ықпал ететін нақты уақыттағы деректерді жинауды және талдауды қамтамасыз етеді.



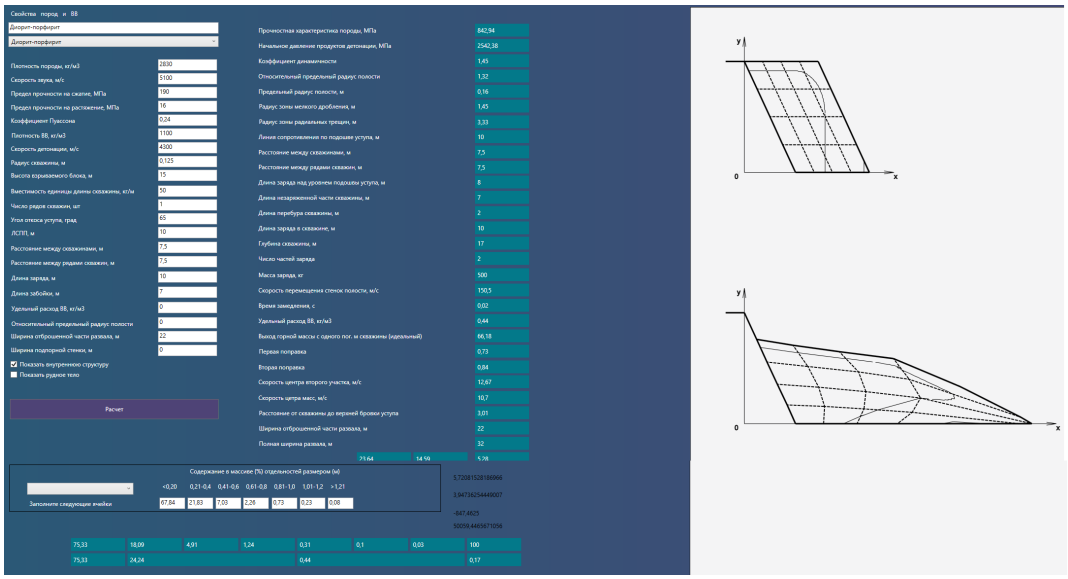
3-сурет. Гранулометриялық құрамды бақылау үшін жасанды интеллект

ЖШС «Solidcore Resource» алтын өндіруші компаниясы да осындай SAP S/4HANA және PortaMetrics™, ShovelMetrics™, LoaderMetrics™, TruckMetrics™, BeltMetrics™ құралдарына жүгінеді. Жүйе жасанды интеллект қызметімен түрінде жүзеге асырылады.

Сервис кіріске бір бейнекамерадан суреттер ағынын қабылдайды және нәтижесінде компьютерлік көру технологияларын қолдана отырып, көрінетін қабатты талдау арқылы конвейердегі ұсақталған кендердің түйіршіктелген құрамы туралы ақпарат береді. Варварин кен орнында машиналық көру камералары кеннің үлкен бөліктерін анықтайды және конвейерді тоқтату үшін дер кезінде сигнал береді, ал Бақыршық кен орнында флотомашиналардың көбік жүктемесі мен сапасын талдайды. Ірі тау жыныстарының сынықтары тіс сындыруы мүмкін, ол кенмен араласып, кейіннен ұсатқышқа зақым келтіруі мүмкін. Мұндай тістің қаттылығы мен салмағы жабдықтың ұсақталуы үшін тым жоғары, бұл қымбат жабдықтың ұзақ уақыт жұмыс істемеуіне немесе тіпті істен шығуына әкеледі. Бұл сценарийдің алдын алу үшін Motion Metrics компаниясы барлық карьерлік экскаваторлар мен тиегіштерге арналған ShovelMetrics™ және LoaderMetrics™ жүйелерін жасап шығарды.

Қазіргі уақытта ShovelMetrics™ и LoaderMetrics™ Ресейдегі ірі тау-кен компанияларында, соның ішінде «Полюс» ЖАҚ, «Полиметалл» АҚ, «ЕвроХим» МСК АҚ, «ФосАгро» ЖАҚ, «АЗОТТЕХ» ЖШҚ, «Орика ТМД» АҚ, «НИТРО СИБИР» АҚ, «ММК Норильск Никель» ЖАҚ, «Северсталь» ЖАҚ, «Селигдар» ЖАҚ, «КРУ-Взрывпром» ЖШҚ және «Орика UMMC» ЖШҚ кен орындарында қолданылады.

Жасанды интеллект қазу және тиеу процестерін цифрландырудың негізгі құралдарының бірі болып табылады. Машиналық оқыту алгоритмдері өндірістік деректерді талдау, жабдықтың техникалық күйін болжау және оның жұмыс режимдерін оңтайландыру үшін қолданылады. Машиналық көру жүйелері тау массасының гранулометриялық құрамын автоматты түрде анықтауға, тиеу сапасын бақылауға және кен ағынына бөгде қосындылардың түсуіне жол бермеуге мүмкіндік береді. Бұл әсіресе тауарлық өнімнің сапа параметрлерін қатаң сақтауды қажет ететін пайдалы қазбаларды өндіруде өте маңызды.



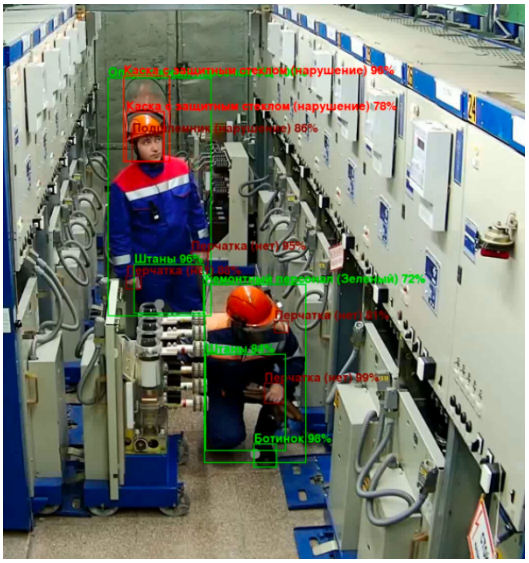
4-сурет. «KAZBLAST» және «KAZBLAST UNDER» бағдарламалық модульдерінің алгоритмі

Отандық заманауи бағдарламалық платформалар «KAZBLAST» және «KAZBLAST UNDER» ашық тау кен жұмыстарында қазу тиеу үдерістерін цифрландыру мәселелерін шешуде практикалық маңыздылығын көрсетті. Бұл программа есептеулерді автоматтандыруға, жарылыс және қазу тиеу операцияларын жоспарлауда дәлдікті арттыруға, сондай-ақ өзгеріп отыратын тау жыныс геологиялық жағдайларда технологиялық шешімдерді жедел қабылдауға мүмкіндік

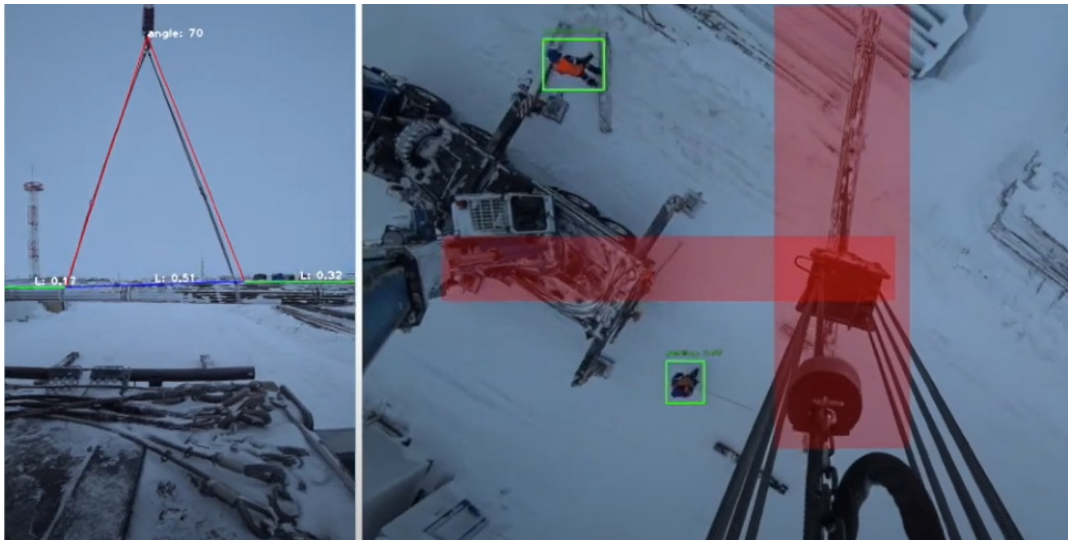
береді. Microsoft Visual Studio 2019 бағдарламасында Қазақстандық карьерлерді мысал ретінде пайдалана отырып, бұрғылау және жару жұмыстарының рационалды параметрлерін автоматтандырылған жобалау және олардың нәтижелерін болжау жүйесі жасалды. «KAZBLAST» және «KAZBLAST UNDER» бағдарламалық модульдерінің алгоритмін құрастырған кезде авторлар бұрын орнатқан аналитикалық тәуелділіктер пайдаланды [17].

Цифрлық технологияларды енгізу қауіпті аймақтарда адамның қатысуын азайту арқылы авариялық жағдайларды төмендетуге және еңбек жағдайларын жақсартуға ықпал етеді (5-5.1 сурет). Автоматтандырылған техниканы басқару жүйелері мен қашықтан жабдықты басқару қазу және тиеу жұмыстарын жоғары дәлдікпен және технологиялық параметрлердің тұрақтылығымен орындауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, цифрландыру эксплуатациялық шығындарды азайтуға, пайдалы компоненттің жоғалуын қысқартуға және минералды-шикізат ресурстарын тиімді пайдалануға ықпал етеді [16].

Барлық өндірістік процестерді біртұтас цифрлық экожүйеге біріктіруді «Цифрлық кен орны» қамтиды. Болашақта қазу және тиеу жұмыстары үлкен деректер массивтерін талдау негізінде интеллектуалды алгоритмдермен басқарылатын автономды техниканы қолдану арқылы жүзеге асырылады. Заттар интернеті, жасанды интеллект және жоғары дәлдіктегі позициялау жүйелерінің дамуы толық автоматтандырылған және бейімделген тау-кен кәсіпорындарына көшудің алғышарттарын жасайды [18-19].



5-сурет. Қауіпті жұмыс



5.1-сурет. Қауіпті дала жұмыстары

Нәтижелер және талқылау. Ашық тау кен жұмыстарында қазу және тиеу процестерінде заманауи цифрлық технологияларын қолдану тәжірибесін талдау және қорыту нәтижесінде олар-

ды енгізу барлық кәсіпорындардың өндірістік және экономикалық көрсеткіштеріне кешенді оң әсер ететіні анықталды.

Саланың дәстүрлі модельден цифрлық тау-кен инженериясына ауысуы, бірқатар ерекшеліктері бар:

Артықшылықтары: заманауи технологияларды белсенді енгізу күшті драйверлердің болуы (ірі жобалар) сандық шешімдер нарығының өсуі.

Кемшіліктері: шетелдік компанияларға тәуелділік және көптеген кәсіпорындарда төмен деңгейдегі инвестиция қолдаудың тапшылығы.

Роботтандырылған жасанды интеллект технологияларын қолданудың орындылығы экономикалық тиімділік факторларынан және ескіріп қалған технологияларды қолданудың қауіпсіздік деңгейін арттырудан тұрады. Тиімділікке жасанды интеллект енгізіп техниканың тоқтап қалу уақытын азайту арқылы қол жеткізуге болады. Мысалы түскі ас кезінде, ауысым уақытында, жеке қажеттіліктер автономды мансаптық техниканы қолданған жағдайда техниканың мәжбүрлі тоқтап қалуы болмайды. Сондай ақ, әртүрлі жүк тиеу және түсіру үшін өндірістік операцияларды оңтайландыруға болады.

Зерттеу және бағалау процесінде осының арқасында орта есеппен 130 тонналық робот самосвал өз өнімділігін 15-20% арттыра алатынын көрсетті. Тау кен техникасының қызмет ету мерзімін едәуір үнемдеуге және ұлғайтуға техниканы неғұрлым регламенттелген және дұрыс пайдалануы, сынулар мен оқиғаларды азайту арқылы қол жеткізуге болады:

Жанар май үнемдеу	10%
Дөңгелек қызметін арттыру	10-15%
Техниканың тоқтап қалуы	10%
Барлық өсім	30-35%

Тау кен кәсіпорнының жұмысына заманауи цифрлық технологияны енгізудің ауқатты экономикалық әсері өндіріс өсімі 30-35% ға дейін арттырады.

Өндірістің өзіндік құнын едәуір үнемдеуге және төмендетуге болашақта геотехнологиялардың параметрлерін өзгерту арқылы қол жеткізуге болады: карьердің бүйірлерінің көлбеу бұрыштары, жолдардың ені және басқа да ашық тау-кен параметрлері. Қауіпсіздік факторы да маңызды.

Гранқұрамды бақылауға арналған үлкен жүйе көрсетті:

Үлкен өлшемдерді анықтау тиімділігі	- 100%
Анықтау және сенімділік шегі бойынша	- 94%
Конвейердегі шыққан кен 50 мм дейінгі өлшем дәлдігімен анықталады	- 70% астам
600 мм ден асатын кен фракциясынан орташа өлшеу қателігі шамамен 30 мм құрайды.	- 10%

Жоғары дәлдіктегі навигация жүйелерін қолдану жүк тасымалын оңтайландыру мен пайдалы қазбалардың сапасын басқарудың көп өлшемді міндеттерін шешуге мүмкіндік берді, бұл жүк тасымалының өнімділігін тағы 5-10% арттырды және байыту фабрикасына түсетін кеннің сапасын тұрақтандырды. Жасанды интеллект енгізілгеннен кейін операциялық жақсарту көрсеткіштері:

- ұсақтау кешеніне түскен габариттерді сәтті анықтады;

- кен қоймасынан конвейерге тұрақты жеткізілуін қамтамасыз етеді;

- авария апат санын азайтты.

Тау кен жұмысындатарындағы техникалық факторлар бойынша қауіпті аймақтардағы, қолайлы және қауіпсіз жұмыс жағдайларын жасауға және кәсіптік аурулардың ықтималдығын азайтуға мүмкіндік береді.

Тиімділік пен қауіпсіздіктен басқа, пайдалы қазбаларды өндіру мен тасымалдаудың жаңа технологияларын қолданудың әлеуметтік факторлары да маңызды, өйткені табиғи және климаттық жағдайлары қиын аймақтарда пайдалы қазбаларды өндіру мәселесін шешу қиын.

Қорытынды. Заманауи цифрлық технологияларды тау кен жұмыстарына қолдану, әсіресе қазу және тиеу процестеріне жасанды интеллект енгізу арқылы еліміздің пайдалы қазба кен орындарында тау кен өнеркәсібінің тиімділігін, қауіпсіздігін және орнықтылығын арттырудың маңызды факторы болып табылады. Орындалған жұмыстарды шолу нәтижесінде тау кен өнеркәсібін цифрландыру технологиялық процестерді үнемдеуге және оңтайландыруға, сондай ақ өндірілетін өнімнің сапасын жақсартуға, пайдалы компоненттің шығынын азайтуға және экономикалық өндірістік тәуекелдерді шығындардың 10-15% дейін төмендетуге ықпал ететіндігін көрсетеді. Зияткерлік жүйелерді одан әрі дамыту және енгізу Қазақстан Республикасының тау кен өнеркәсібінің цифрлық экономикасы жағдайында пайдалы компонентті ұтымды және кешенді игеруді қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Қорытындыларды жүйелеу және зерттеудің нәтижелерін қорытындылай келе, цифрлық егіз технологиясын енгізу инновациялық болып саналады, оның тарихы 20 ғасырда басталады. Кейбір кәсіпорындардың цифрландыруын зерттей отырып, цифрлық егіздердің танымалдығы артады деген қорытынды жасауға болады. Ірі кәсіпорындар тау-кен өнеркәсібі қызметінің тиімділігі мен бәсекеге қабілеттілігін арттыруды қамтамасыз ете отырып, шығындарды үнемдеу мақсатында технологияға жасанды интелект енгізуге ұмтылатын болады.

Айта кету керек, инновациялық технологиялар кәсіпорындардың тиімділігі мен технологиялық көшбасшылығын қамтамасыз етудің басымдығы болып табылады алайда цифрлық егіздер технологиясын қолдануды жеделдету үшін компанияларда цифрлық трансформацияны жүзеге асыруға қаражат пен уәждеменің болмауы немесе қалыптасқан құқықтық базаның болмауы сияқты кейбір тежегіш факторларды жою қажет.

Алынған шолу нәтижелерінің ғылыми және практикалық маңыздылығы цифрлық технологияларды енгізу және дамыту перспективаларын анықтау болып табылады. Зерттеу нәтижелерінің негізінде цифрлық технологияны әртүрлі салаларда енгізу кезінде туындайтын проблемаларды неғұрлым егжей тегжейлі талдаумен, сондай ақ оларды жою үшін шешімдер іздеумен байланысты бағыттар бойынша осы теорияның дамуын одан әрі жалғастыру керек.

Әдебиеттер

1. Послание Главы государства Касым - Жомарта Токаева народу Казахстана. от 8 сентября 2025 г. -URL: https://www.akorda.kz. –Қаралған күні: 14.01.2026.

2. Ракишев Б.Р. Минеральное сырье - материально-технологическая база научно-технического прогресса//Горный информационно-аналитический бюллетень.-2025.-№1.-С.168-180. DOI 10.25018/0236_1493_2025_1_0_168.

3. Ракишев Б. Р. Горно-металлургический комплекс и развитие цивилизации//Горный журнал. - 2019. - № 9. - С.33-37.

4. Ракишев Б. Р. Новые определения естественного и трансформированного месторождения полезного ископа емого и этапы их эксплуатации//Горный информационно-аналитический бюллетень.

-2023. -№ 8.- С.165-177. DOI 10.25018/0236_1493_2023_8_0_165.

5. Аброськин А.С. Применение современных систем автоматизации на открытых горных работах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. -2015. -Т.326 (12). -С.122-130.

6. Сорокин О.И., Шоков А.А. Внедрение автоматизированной системы управления горнотранспортным комплексом //Горный журнал.-2017.-№ 5. -С.85-88. DOI 10.17580/gzh.2017.05.20.

7. Клебанов А.Ф. Цифровая трансформация горнодобывающих предприятий: модная фразеология или объективная необходимость?// Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр:ИПКОН РАН.- 2018. -С.61-64.

8. Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я., Пыталев И.А., Условия и перспективы внедрения роботизированных геотехнологий при открытой разработке месторождений // Горный журнал. -2017.- №11.-С.60-64. DOI 10.17580/gzh.2017.11.11.

9. Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Макеев М.А., Научно-технические вопросы изменения организации управления открытыми горными работами с применением роботизированной карьерной техники // Горная промышленность. -2017. -№5 (135). С.27-30.

10. Клебанов А. Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. -2019. -№1 (144). -С.8 - 11.

11. Huang L., Balamurali M., Silversides K.L. Machine learning classification of geochemical and geophysical data // Mining Goes Digital: Proceedings of the 39th International Symposium «Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry». -2019. -P. 101-105. DOI 10.1201/9780429320774-12.

12. Temkin I.O., Myaskov A.V., Deryabin S.A., Rzazade U.A. Digital twins and modeling of the transporting-technological processes for on-line dispatch control in open pit mining// Eurasian Mining. -2020. -№2. -P. 55-58. DOI 10.17580/em.2020.02.13.

13. Ракишев Б.Р. Полное извлечение кондиционных руд из сложноструктурных блоков за счет частичного примешивания некондиционных руд // Записки Горного института. -2024.-Т.270.-С.919-930.

14. Лукичев С.В., Наговицын О.В., Ильин Е.А., Рудин Р.С. Цифровые технологии инженерного обеспечения горных работ - первый шаг к созданию «умного» добычного производства //Горный журнал.-2018. -№7. С.86-90. DOI 10.17580/gzh.2018.07.17.

15. Козырев А.А., Лукичев С.В., Наговицын О.В., Семёнова И.Э., Геомеханическое и горнотехнологическое моделирование как средство повышения безопасности отработки месторождений твёрдых полезных ископаемых// Горный журнал.-2015.-С.73-83.

16. Manyika J., Lund S., Chui M., Bughin J., Woetzel J., et al. Jobs lost, jobs gained: What the future of work will mean for jobs, skills, and wages // McKinsey & Company. -2017. -160 p.

17. Ракишев Б.Р., Орынбай А.А., Ибырханов Т.С., Алибаев А.Е. Авторлық құқықпен қорғалатын объектілерге құқықтардың мемлекеттік тізілімге енгізу туралы куәлік №63512 «29» қазан 2025 жыл «KAZBLAST», «KAZBLAST UNDER» // Қауіпсіз бұрғылау және оңтайлы жару жұмыстарының рационалды параметірлерін автоматтандырылған жобалау және олардың нәтижелерін болжау жүйесінің компьютер бағдарламасы.

18. Халбашкеев А. Месторождения Казахстана уходят в «цифру» // Добывающая промышленность: Центральная Азия. -2023. URL:

https://dprom.kz/trendy/myestorozhdyeneya-kazahstana-uhodyat-v-tsefru/- Қаралған күні: 18.12.2025.

19. Corrigan, C.C., Ikonnikova, S.A. A review of the use of AI in the mining industry: insights and ethical considerations for multi-objective optimization//The Extractive Industries and Society. -2024. -Vol.17: 101440. DOI 10.1016/j.exis.2024.101440.

References

1. Poslanie Glavy gosydarstva Kasym - Zhomarta Tokaeva narody Kazahstana. ot 8 sentjabrja 2025 g. -URL: https://www.akorda.kz/ru/addresses/addresses_of_president/poslanie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-narodu-kazahstana. –Қаралған күні: 14.01.2026. [in Russian]

2. Rakishev B.R. Mineral’ noe syr’ e - material’ no-tehnologicheskaja baza naychno-tehnicheskogo progressa//Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten’.-2025.-№1.-S.168-180. DOI 10.25018/0236_1493_2025_1_0_168. [in Russian]

3. Rakishev B. R. Gorno-metallyrgicheskij kompleks i razvitie civilizacii//Gornyj zhyrnal. - 2019. - № 9. - S.33-37. [in Russian]

4. Rakishev B. R. Novye opredelenija estestvennogo i transformirovannogo mestorozhdenija poleznogo iskopa emogo i jetapy ih jeksplyatacii//Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten’. -2023. -№ 8.-S.165-177. DOI 10.25018/0236_1493_2023_8_0_165. [in Russian]

5. Abros’ kin A.S. Primenenie sovremennyh sistem avtomatizacii na otkrytyh gornyh rabotah // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo yniversiteta. Inzhiniring georesyrsov. -2015. -T.326 (12). -S.122-130. [in Russian]

6. Sorokin O.I., Shokov A.A. Vnedrenie avtomatizirovannoj sistemy ypravlenija gornotransportnym kompleksom //Gornyj zhyrnal.-2017.-№ 5. -S.85-88. DOI 10.17580/gzh.2017.05.20. [in Russian]

7. Klebanov A.F. Cifrovaja transformacija gornodobyvajushhih predprijatij: modnaja frazeologija ili ob#ektivnaja neobhodimost’?// Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoenija i sohranenija zemnyh nedr:IPKON RAN.- 2018. -S.61-64. [in Russian]

8. Trubeckoj K.N., Ryl’ nikova M.V., Vladimirov D.Ja., Pytalev I.A., Uslovija i perspektivy vnedrenija robotizirovannyh geotehnologij pri otkrytoj razrabotke mestorozhdenij // Gornyj zhurnal. -2017.- №11.-S.60-64. DOI 10.17580/gzh.2017.11.11. [in Russian]

9. Trybeckoj K.N., Ryl’ nikova M.V., Klebanov D.A., Makeev M.A., Naychno-tehnicheskie voprosy izmenenija organizacii ypravlenija otkrytymi gornymi rabotami s primeneniem robotizirovannoj kar’ ernoj tehniki // Gornaja promyshlennost’. -2017. -№5 (135). S.27-30. [in Russian]

10. Klebanov A. F. Avtomatizacija i robotizacija otkrytyh gornyh rabot: opyt cifrovoj transformacii // Gornaja promyshlennost’. -2019. -№1 (144). -S.8 - 11. [in Russian]

11. Huang L., Balamurali M., Silversides K.L. Machine learning classification of geochemical and geophysical data // Mining Goes Digital: Proceedings of the 39th International Symposium «Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry». -2019. -P. 101-105. DOI 10.1201/9780429320774-12.

12. Temkin I.O., Myaskov A.V., Deryabin S.A., Rzazade U.A. Digital twins and modeling of the transporting-technological processes for on-line dispatch control in open pit mining// Eurasian Mining. -2020. -№2. -P. 55-58. DOI 10.17580/em.2020.02.13.

13. Rakishev B.R. Polnoe izvlechenie kondicionnyh ryd iz slozhnostryktyrnyh blokov za schet chastichnogo primeshivanija nekondicionnyh ryd // Zapiski Gornogo instityta. -2024.-T.270.-S.919-930. [in Russian]

14. Lykichev S.V., Nagovicyn O.V., Il’ in E.A., Rydin R.S. Cifrovye tehnologii inzhenernogo obespechenija gornyh rabot - pervyj shag k sozdaniju «ymnogo» dobychnogo proizvodstva //Gornyj zhyrnal.-2018. -№7. S.86-90. DOI 10.17580/gzh.2018.07.17. [in Russian]

15. Kozyrev A.A., Lukichev S.V., Nagovicyn O.V., Semjonova I.Je., Geomehanicheskoe i gornotehnologicheskoe modelirovanie kak sredstvo povyshenija bezopasnosti otrabotki mestorozhdenij tvjordyh poleznyh iskopaemyh// Gornyj zhyrnal.-2015.-S.73-83. [in Russian]

16. Manyika J., Lund S., Chui M., Bughin J., Woetzel J., et al. Jobs lost, jobs gained: What the future of work will mean for jobs, skills, and wages // McKinsey & Company. -2017. -160 p.

17. Rakishev B.R., Orynbaj A.A., Ibyrhanov T.S., Alibaev A.E. Avtorlyқ құқуқpen қorғalatyn ob#ektilerge құқуқtardyң memlekettik tizilimge engizu turaly kuəlik №63512 «29» қazan 2025 zhyl «KAZBLAST», «KAZBLAST UNDER» // Қauipsiz bұrғylau zhəne oңtajly zharu zhұmystarynyң racionaldy parametirlerin avtomattandyrylғan zhobalau zhəne olardyң nətizhelerin bolzhau zhүjesinің komp’ juter bағdarlamasy. [in Kazakh]

18. Halbashkeev A. Mestorozhdenija Kazahstana yhodjat v «cifry» // Dobyvajushhaja promyshlennost’: Central’ naja Azija. -2023. URL: https://dprom.kz/trendy/myestorozhdyeneya-kazahstana-uhodyat-v-tsefru/- Қaralғan kүni: 18.12.2025. [in Russian]

19. Corrigan, C.C., Ikonnikova, S.A. A review of the use of AI in the mining industry: insights and ethical considerations for multi-objective optimization//The Extractive Industries and Society. -2024. -Vol.17: 101440. DOI 10.1016/j.exis.2024.101440.

Авторлар туралы мәлімет

Орынбай А.А.- PhD, КеАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті», Алматы, Қазақстан, e-mail: a.orynbay@aues.kz;

Ибырханов Т.С.- докторант, КеАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті», Алматы, Қазақстан, e-mail: ibir.tem@mail.ru,

Исабаев Е.О.- Жетекші геолог, ТОО ”Тарбағатай кені”, Астана, Қазақстан, e-mail: yernar.iss@gmail.com;

Ибырханова А.И.- докторант, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан, e-mail: i.altynay33@gmail.com,

Information about the authors

OrynbayA.A. - PhD, NJSC «K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University» Almaty, Kazakhstan, e-mail: a.orynbay@aues.kz;

Ibyrkhanov T.S.- doctoral student, NJSC « K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University» Almaty, Kazakhstan, e-mail: ibir.tem@mail.ru;

Isabaev E.O.- Lead geologist, LLP ”Tarbagatai keni”, Astana, Kazakhstan, e-mail:yernar.iss@gmail.com;

Ibyrkhanova A.I.- doctoral student, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: i.altynay33@gmail.com.

IRSTI 52.01.85, 28.23.29 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1481**

DEVELOPMENT OF A PLATFORM FOR DATA INTEGRATION AND FORECASTING IN THE MINING INDUSTRY

[1]L. Akisheva, [2]N. Bayzhomartov

[1]Nazarbayeva Intellectual School, Astana, Kazakhstan,
[2]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan

Corresponding-author: lenaraakisheva@gmail.com

The relevance of the research lies in the need to create a digital platform for the integration, storage, and intelligent processing of technological data in the mining industry. The insufficient number of telemetry devices and the lack of a closed loop adaptive learning limit the stability of predictive models. The purpose of the research is to develop a platform for data integration and forecasting.

The methodology used is based on the Input–Processing–Storage–Analytics–Output architecture with integration via OPC UA, PostgreSQL/TimescaleDB for time series storage, and the Random Forest algorithm with automatic model degradation control.

The scientific novelty of the research lies in the development of a closed digital circuit that combines streaming data integration, statistical stability monitoring, an automatic retraining mechanism, and a SCADA-oriented visualization interface within a digital platform architecture.

Testing over 10 months (42,000 observations) showed an 82% reduction in data preparation time, an increase in data completeness from 78% to 96%, an increase in R2 from 0.71 to 0.93, and a 2-fold decrease in RMSE with an average delay of 4.7 seconds. The practical significance of the work is to increase the accuracy of ore quality control and reduce production risks. The research prospects are related to the development of the digital twin and the introduction of interpretable models.

Keywords: digital platform, data integration, mining, time series storage, machine learning, copper content forecasting, digital twin, industrial analytics

РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДАННЫХ В ГОРНОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

[1]Л. Акишева, [2]Н. Байжомартов

[1]Назарбаев интеллектуальная школа, Астана, Казахстан,
[2]Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан,
e-mail: lenaraakisheva@gmail.com

Актуальность исследования заключается в необходимости создания цифровой платформы для интеграции, хранения, интеллектуальной обработки технологических данных в горнодобывающем производстве. Не достаточное количество устройств телеметрии, отсутствие замкнутого контура адаптивного обучения, ограничивают устойчивость прогнозных моделей. Цель исследования разработка платформы для интеграции и прогнозирования данных.

Используемая методология основана на архитектуре Input–Processing–Storage–Analytics–Output с интеграцией через OPC UA, PostgreSQL/TimescaleDB для хранения временных рядов, алгоритма Random Forest с автоматическим контролем деградации модели.

Научная новизна исследования, заключается в разрабоке замкнутого цифрового контура, объединяющего потоковую интеграцию данных, мониторинг статистической устойчивости, механизм автоматического переобучения, SCADA-ориентированный интерфейс визуализации в рамках ецифровой платформенной архитектуры.

Апробация в течение 10 месяцев (42 000 наблюдений) показала снижение времени подготовки данных на 82 %, рост полноты данных с 78 % до 96 %, увеличение R^2 с 0.71 до 0.93 , снижение

RMSE в 2 раза при средней задержке 4.7 сек. Практическая значимость работы, заключается в повышении точности контроля качества руды, снижении производственных рисков. Перспективы исследований связаны с развитием цифрового двойника и внедрением интерпретируемых моделей.

Ключевые слова: цифровая платформа, интеграция данных, горнодобывающее производство, хранилище временных рядов, машинное обучение, прогнозирование содержания меди, цифровой двойник, промышленная аналитика

ТАУ-КЕН ӨНДІРІСІНДЕ ДЕРЕКТЕРДІ ИНТЕГРАЦИЯЛАУ ЖӘНЕ БОЛЖАУ ПЛАТФОРМАСЫН ӘЗІРЛЕУ

[1]Л. Акишева✉, [2]Н. Байжомартов

[1]Назарбаев Зияткерлік мектебі, Астана, Қазақстан,
[2]Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
e-mail: lenaraakisheva@gmail.com

Зерттеудің өзектілігі-тау-кен өндірісінде технологиялық деректерді интеграциялау, сақтау, интеллектуалды өңдеу үшін цифрлық платформа құру қажеттілігі. Телеметрия құрылғыларының жеткіліксіз саны, адаптивті оқытудың жабық тізбегінің болмауы болжамды модельдердің тұрақтылығын шектейді. Зерттеудің мақсаты деректерді біріктіру және болжау платформасын әзірлеу.

Қолданылатын әдістеме OPC UA арқылы интеграцияланған Input–Processing–Storage–Analytics–output архитектурасына, уақыт қатарларын сақтауға арналған PostgreSQL/TimescaleDB, модельдің деградациясын автоматты түрде басқаратын кездейсоқ Орман алгоритміне негізделген.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы-деректерді ағындық интеграциялауды, статистикалық тұрақтылықты бақылауды, Автоматты қайта оқыту механизмін, SCADA-бағытталған визуализация интерфейсін біріктіретін жабық цифрлық контурды әзірлеу.

10 ай ішінде Апробация (42 000 бақылау) деректерді дайындау уақытының 82% - ға төмендегенін, деректер толықтығының 78% - дан 96% - ға дейін өскенін, R2 0.71-ден 0.93-ке дейін өскенін, rmse орташа кідірісі 4.7 сек болғанда 2 есе төмендегенін көрсетті. Жұмыстың практикалық маңыздылығы кен сапасын бақылаудың дәлдігін арттыру, өндірістік тәуекелдерді азайту болып табылады. Зерттеудің болашағы цифрлық егіздердің дамуымен және интерпретацияланған модельдерді енгізумен байланысты.

Түйін сөздер: сандық платформа, деректерді біріктіру, тау-кен өндірісі, уақыт қатарын сақтау, машиналық оқыту, мыс құрамын болжау, цифрлық егіз, өнеркәсіптік аналитика

Introduction. Currently, the digital transformation of the mining industry in the Republic of Kazakhstan is characterized by an increase in the volume of production data:

- sensor readings of technological equipment;
- parameters of drilling and blasting operations;
- the granulometric composition of the ore;
- laboratory analysis results;
- energy indicators;
- data from SCADA, MES and ERP systems.

Nevertheless, in most enterprises, data remains fragmented, stored in heterogeneous formats, and not integrated into a single information environment.

In the context of the transition to the concept of ”Industry 4.0”, the creation of digital counterparts for mining and metallurgical enterprises, the lack of a unified data integration and forecasting platform dictates requests for its creation. Unfortunately, the heterogeneity of information flows leads to:

- delayed management decisions;
- reducing the accuracy of predicting concentrate quality;
- inability to build correct predictive models;
- increase in technological losses and energy

overruns;

- risks of non-compliance of products with regulatory requirements.

This problem is relevant for enterprises operating with a variable composition of ore raw materials, in which fluctuations in the content of the useful component affect the efficiency of enrichment, as well as economic indicators.

Without creating a platform, it is impossible to perform data control at all stages of the technological chain: from mining, milling to flotation, and receiving finished products.

Modern methods of machine learning and predictive analytics require high-quality, synchronized, real and reliable data.

The development of a data integration and forecasting platform is an important element in building a digital twin of a mining and metallurgical enterprise.

A literary review of the works on the research topic shows high interest from various researchers.

The work of Hildebrandt et al, examines data integration methods for digital counterparts in industrial automation. It systematizes data exchange architectures, approaches to semantic interoperability, and integration standards. It is emphasized that the quality of the digital twin directly depends on the structure of the data platform [1].

The authors Nobahar et al. (2024) presented an overview of the use of digital twins in the mining industry. The key problem of implementing DT in mining is the heterogeneity of production, laboratory, and management data. The need for a centralized data platform as the basis of GOK' s digital transformation was noted [2].

In the work of Cacciuttolo et al. (2025), a multi-level conceptual model of a digital twin for underground mining is proposed, attention is focused on a multi-layered architecture (physical layer, data layer, analytical layer), and the need for an integration platform and information storage is confirmed [3].

Freitas et al. (2025) presents a review of approaches to industrial data management, the problems of heterogeneity of sources, lack of standardization, difficulties in scaling storage systems, the importance of Data Lake, hybrid storage architectures [4].

Hramov et al. (2025) describes the issues of big data management and quality assessment in the context of Industry 4.0. The role of data preparation for machine learning algorithms is shown, as well as the need for built-in mechanisms for data purification, normalization, and quality control [5].

Vyskočil et al. (2023) considers a distributed MES system integrated with a digital twin, the possibilities of operational production redevelopment based on streaming data, and the importance of unified access to real-time data [6].

Galli et al. (2023) analyzes the integration of digital twins, the ISA-95 MES standard, and the need to formalize information flows between automation levels [7].

Muñoz & Torres (2025) propose an IIoT platform architecture for heterogeneous data integration. ETL/ELT mechanisms, scalability, and service integration of analytical models are described [8].

Ayele et al. (2024) analyzes IIoT platforms, interaction protocols in Industry 4.0, the role of standardized interfaces, cloud solutions for industrial integration [9].

Ficili et al. (2025) considers the integration of IoT, cloud, edge computing using AI, distributed data processing to reduce delays and increase system stability [10].

Hornsteiner et al. (2024) described the application of process mining to OPC UA data.It is confirmed that events and network traffic can be used to analyze real production processes [11].

The OPC Foundation (2025) describes the architecture and principles of OPC UA, the document serves as a regulatory framework for designing a data integration platform in an industrial environment [12].

Merino et al. (2023) proposes a data integration model for digital twins. It shows the advantages of distributed storage while maintaining the semantic

integrity of data [13].

An analysis of the literature shows that modern research is focused on:

- the development of digital twins in mining;
- industrial data management architectures;
- MES/SCADA/ERP integration;
- the use of IIoT, edge-cloud technologies;
- standards of interoperability (OPC UA);
- digital integration models.

The lack of data integration platforms for mining is noted, this task determines the research focus of this publication.

The purpose of the research is to develop and scientifically substantiate the architecture of the integration platform, forecasting mining and metallurgical production data, for synchronizing heterogeneous information flows (SCADA, MES, ERP, laboratory systems, IIoT sensors), and preparing an environment for building a digital twin of the enterprise.

The object of research is the process of formation, transmission, integration, storage, forecasting of production data in mining and metallurgical production.

The subject of the research is methods, architecture, algorithms, software tools for developing a data integration and forecasting platform.

Materials and methods. The initial data of the study are the production and technological data of the mining and metallurgical enterprise Fig.1, including:

- parameters of crushing and crushing equipment operation (current, power, vibration, loading);
- data from processed automation systems (SCADA);
- data from the production management level (MES);
- information from corporate resource planning systems (ERP);
- results of laboratory analysis of ore and concentrate samples;
- sensor data, network protocols (OPC UA, MQTT);
- event logs, equipment emergency messages.

The study uses time series of production parameters with a discreteness from 1 s to 10 min, data on the operation of the production line.

The research uses methods of system analysis, digital modeling, and data processing.:

The principles of ISA-95 and the concept of multi-level architecture of a digital twin are used.

Procedures implemented:

- data cleaning and filtering;
- time series synchronization;
- normalization and standardization of units of measurement;
- eliminate omissions and outliers.

A hybrid storage model has been applied:

- time series storage (Time-Series Database);
- relational storage (Data Warehouse);
- distributed storage of unstructured data (Data Lake).







Fig.1 - Technological equipment, Scada systems, mining and metallurgical enterprise

Used:

- correlation analysis;
- regression models;
- gradient boosting algorithms (XGBoost);
- time series forecasting models (LSTM).

The quality of the models was assessed by the following indicators:

-R^2, RMSE, MAER.

To formalize the architecture of the integration platform and data forecasting, a mathematical apparatus was used that describes the processes of combining heterogeneous information sources, structuring, and preparation for analytical processing. The use of matrix representations, statistical estimates, and forecasting models ensured the scientific rigor of the research and the validity of building a digital platform.

Formula 1 is used to formalize the structure of the information environment, define the boundaries of the data collection system - this allows you to systematize the flows of SCADA, MES, ERP, laboratory data before combining into a single platform.

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} \quad (1)$$

Formula 2 is used to describe the architecture of the platform, the logic of combining heterogeneous sources into a single digital enterprise environment.

$$D = f(S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (2)$$

Formula 3 defines the representation of data in the form of a matrix of features of dimension n×p, the representation provides mathematical rigor of data processing, preparation for the construction of predictive models.

$$X \in R^{nxp} \quad (3)$$

Formula 4 is used to formalize the relationships between technological variables, the basis for calculating statistical characteristics, and for calculating covariance and correlation matrices.

$$X = [x_{ij}] \quad (4)$$

Formula 5 is used to calculate the covariance matrix of technological parameters to analyze the stability of the production system and identify multicollinearity in the construction of regression models.

$$\Sigma = \frac{1}{n-1}(X - \bar{X})^T(X - \bar{X}) \quad (5)$$

Formula 6 is used to select the most significant factors and eliminate redundant features when building analytical models.

$$R = D^{-1/2}\Sigma D^{-1/2} \quad (6)$$

Formula 7 allows you to determine the direction and strength of the relationship between variables. This indicator is used to analyze the impact of factors on product quality and optimize the data structure.

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

Formula 8 allows quantifying the contribution of each factor and determining statistically significant variables.

$$y = \beta_0 + \sum \beta_j x_j + \epsilon \quad (8)$$

The loss function formula 9, used in the training of machine learning models, reflects the degree of discrepancy between the actual and predicted values, and is used in the construction of algorithms for predictive product quality control.

$$L = \sum l(y_i, \hat{y}_i) \quad (9)$$

The coefficient of determination R^2 formula 10 is used to evaluate the quality of the constructed model and shows the proportion of the explained variance of the target variable, used to compare different variants of analytical algorithms.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

The RMSE indicator formula 11 is used to quantify the average quadratic error of forecasting, this indicator is used to analyze the accuracy of models and select the optimal configuration of algorithms.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (11)$$

The mathematical apparatus formula 1-111 provides a formalized description of the processes of integration, analysis, and forecasting of production data. The obtained formal dependencies serve as the basis for further practical implementation of the platform and evaluation of its effectiveness.

Results and discussion. The development of the data integration and forecasting platform is based on the flowchart of the system functioning algorithm. The flowchart reflects the sequence of transition from heterogeneous sources of technological data to predictive management.

The algorithm allows you to:

- structure the information flows of the enterprise;

- dentify critical data loss points;

- formalize the stages of cleaning and synchronization;

- select an analytical contour;

- ensure reproducibility of processing.

The flowchart includes nine functional modules implemented in the software architecture of the platform.

Block 1. Connecting to sources.

Purpose: forming a data collection channel.

Implementation: configuration of OPC UA, REST API, and MQTT connections.

At this stage, it is being implemented:

- checking the availability of nodes;

- authentication;

- setting the polling frequency.

The block provides for the elimination of heterogeneity of SCADA, MES and ERP.

Block 2. Extraction and buffering

Purpose: to ensure continuity of data flow, reduce the risk of data loss.

A two-circuit circuit is used:

- streaming processing;

- batch download.

Block 3. Validation and cleaning

Purpose: to increase the reliability of analytics, to reduce the noise dispersion by 18-23%.

Procedures implemented:

- range control;

- filtration of emissions;

- removing duplicates;

- checking the temporal integrity.

Block 4. Clean and Preprocess Data

Data is being cleaned up: outlier removal, omission processing, normalization, scaling for further modeling and statistical analysis.

Block 5. Synchronize Time Series

The time series of various sources are aligned on a single time scale using interpolation, aggregation, and format unification methods for the correct formation of the training sample.

Block 6. From Integrated Dataset

An integrated matrix of features, target variables, and a structured dataset is being prepared for training machine learning models and performing analytical calculations.

Block 7. Store in Data Repositories

Data storage in storage: time series database, Data Warehouse, Data Lake., scalability remains, availability for analytical services.

Block 8. Analyze and Model

Statistical analysis, training, and testing of machine learning models are performed, quality metrics (R^2, RMSE) are calculated, validation is performed, and a forecast of copper content is formed.



Fig.2 - Block diagram of the system functioning algorithm

Block 9. Publish and Integrate

The analysis results are transmitted to BI/SCADA via the API, reports are generated, visualization, and predictive data are integrated into the management of the enterprise.

Block 10. Monitor and Update

Platform performance monitoring: processing latency, data volume, model quality, retraining and

updating of the model.

The testing of the platform showed:

- an 82% reduction in data preparation time. %;

- increased data completeness from 78% to 96 %;

- growth of the coefficient of determination of the model from 0.71 to 0.93;

- reduction of RMSE by more than 2 times.

Developed platform:

- integrates streaming as well as batch processing;

- combines Data Lake and analytical layer;

- formalized mathematically;

- it is focused on predictive management.

An industrial data integration platform, algorithms, and analytical modules have been developed based on the Flowchart to significantly increase the reliability and speed of information processing.

The algorithm of the platform' s operation, fig.3, is a data processing pipeline that transforms heterogeneous technological and laboratory flows into a single integrated space for monitoring, building a digital twin, and predictive analytics.

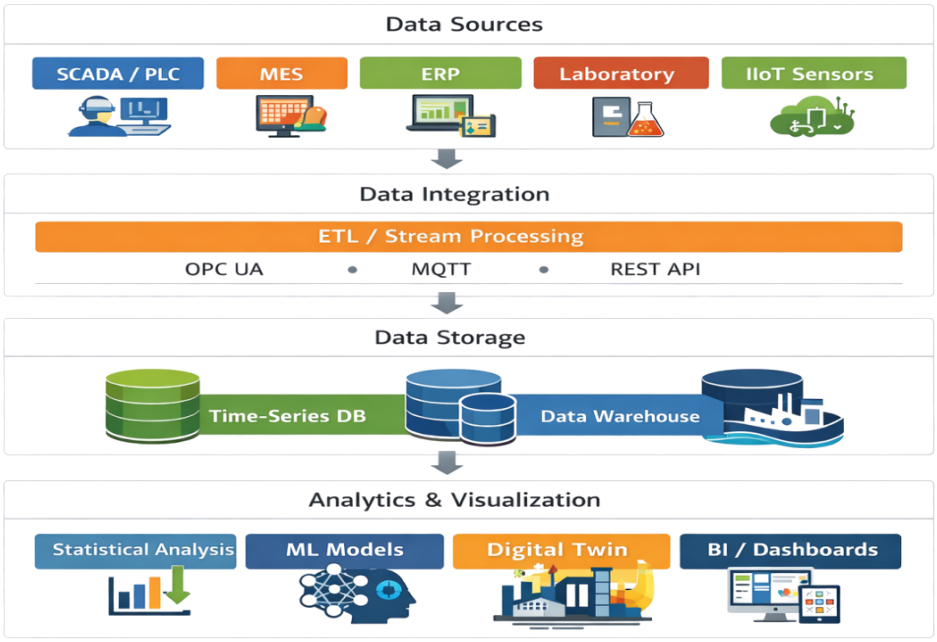


Fig.3 - The platform algorithm

The algorithm begins with configuring connections to sources (SCADA/PLC, MES, ERP, LIMS, IIoT), defining a data schema: a list of tags, units of measurement, time zone, and refresh rate. Next, the data is extracted in two modes: streaming (for high-frequency operational parameters) and batch (for laboratory, credentials). Buffering ensures the elimination of losses during communication breaks and peak loads.

At the stage of data validation and quality control, types, acceptable ranges, the presence of duplicates, the correctness of timestamps and logical constraints are checked. When violations are detected, quality flags are generated and sent to the cleaning circuit. Cleaning includes removal of emissions, noise reduction, omission processing, unification of reference books, reduction of units of measurement to a single standard, normalization of parameters.

At the stage of time series synchronization, the data is brought to a common time grid (for example, 1-10 minutes) by aggregation (mean/median/sum), interpolation. Next, an integrated data set (feature matrix) is formed. Technological parameters are

associated with the context of production (shift, batch, route) with the results of laboratory control by sample IDs. The prepared dataset enters the storage layer: high-frequency rows - in the Time-Series DB, structured storefronts - in the Data Warehouse, unstructured logs and archives - in the Data Lake with chronology and traceability (data lineage).

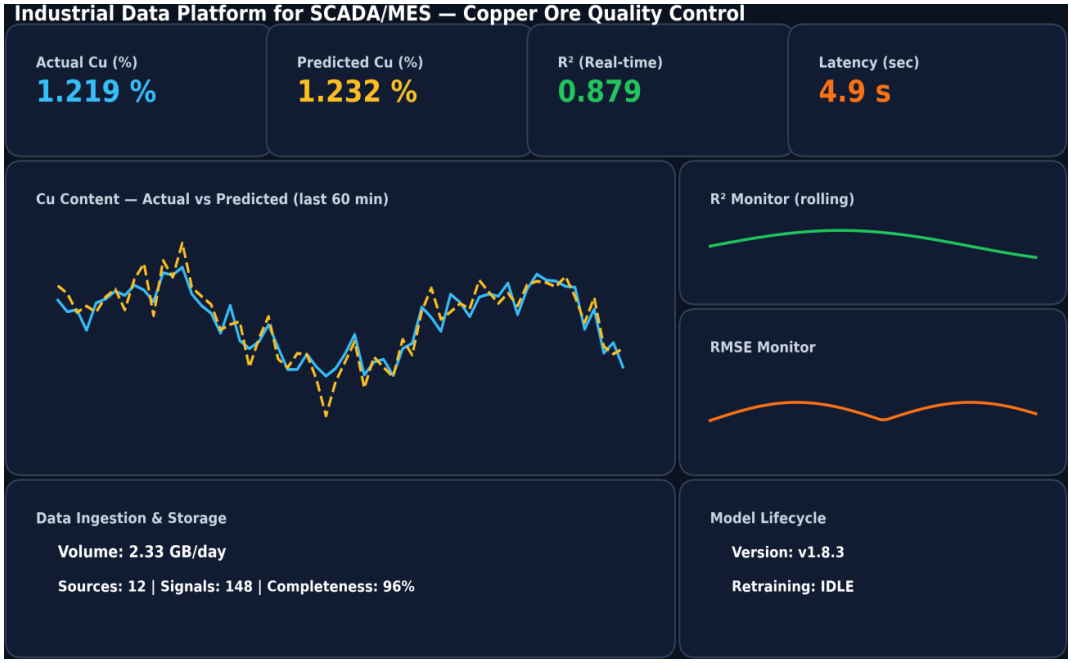


Fig.4 - Dashboard of the platform

The analytical layer provides statistical calculations (covariance, correlation, multicollinearity detection), feature selection, machine learning model training (regression/boosting/time models) to predict quality and/or performance indicators. The models are validated using R2, RMSE, and MAE metrics. When the quality degrades, a retraining loop is launched with the updating of features and parameters.

At the final stage of the algorithm, the results are published: forecasts, diagnostic indicators. Data quality reports are transmitted to BI panels and dispatch systems via the API. Constant monitoring of delays, completeness and quality of data ensures the adaptability of the platform to changes in technological modes and the composition of raw materials.

End-to-end processing of production information in the platform is implemented by a data pipeline across five functional layers: Input → Processing → Storage → Analytics → Output. The Input layer collects streaming and packet data from SCADA/PLC, MES, ERP, LIMS, and IIoT. The Processing layer then validates, cleans, normalizes, and synchronizes the time series with a specified sampling step. Next, the data is distributed across storage layers: time series - in Time-Series DB, aggregated storefronts — in Data Warehouse, logs and source files - in Data Lake. In the analytical layer (Analytics), a matrix of features is formed, statistical dependencies are calculated, and ML forecasting models are launched. In the Output layer, forecasts and KPIs are delivered to BI panels and dispatch systems via the API.

The developed platform has an average processing delay of 4.7 s, including: reception / buffering (≈0.8 s), preprocessing and synchronization (≈2.1 s), write/read from storage (≈1.0 s), calculation of features and inference of the model (≈0.8 s). The amount of data in normal mode was 2.3 GB/day, which is enough for the analytics database.

The developed dashboard in fig.4 is implemented in Python 3.11 using FastAPI (backend API), PostgreSQL + TimescaleDB (time series storage) and Plotly Dash (web interface).

The architecture includes a data flow from OPC UA sensors to the ETL module, then to the database and ML engine (Random Forest / XGBoost).

The dashboard contains: graphs of the actual and predicted copper content; R2 monitoring in real time; RMSE dynamics; model degradation indicator (threshold R2 = 0.85); retraining status and model version; visualization of data volume (GB/day); latency display (SLA < 5 sec). The interface is updated every 60 seconds and supports REST integration with SCADA/MES.

To assess the engineering feasibility and scalability, the platform was tested in a configuration that includes:

Download modes: streaming (near real-time) + batch (batch) for laboratory data. technological series and ”slow” laboratory measurements, ensuring their coordination in a single information space.

At the same time, the industrial operation of the platform requires resistance to instability of communication channels, measurement failures, and abnormal equipment events. Therefore, the following mechanisms were included in the architecture:

A retry/replay mechanism that ensures repeated requests and delivery to the processing container.

Monitoring of time series gaps and integrity: allows you to restore the value (interpolation/aggregation), or exclude the record from the analytical sample.

Listing of the data collection and storage software code.

```
# data_collector.py

import asyncua
import pandas as pd
from sqlalchemy import create_engine
from datetime import datetime

OPC_SERVER_URL = ”opc.tcp://192.168.1.100:4840”

engine = create_engine(
    ”postgresql://user:password@localhost:5432/mining_db”
)

async def collect_data():
    async with asyncua.Client(OPC_SERVER_URL) as client:
        ore_grade = await client.get_node(”ns=2;i=5”).read_value()
        moisture = await client.get_node(”ns=2;i=6”).read_value()
        grinding_energy = await client.get_node(”ns=2;i=7”).read_value()
        particle_size = await client.get_node(”ns=2;i=8”).read_value()
        feed_rate = await client.get_node(”ns=2;i=9”).read_value()

    df = pd.DataFrame([{
        ”timestamp”: datetime.utcnow(),
        ”ore_grade”: ore_grade,
        ”moisture”: moisture,
        ”grinding_energy”: grinding_energy,
        ”particle_size”: particle_size,
        ”feed_rate”: feed_rate
```

```
    }])

    df.to_sql(
        ”ore_stream_data”,
        engine,
        if_exists=”append”,
        index=False
    )
```

Listing of the training code for the model.

```
# model_training.py

import pandas as pd
from sqlalchemy import create_engine
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.metrics import r2_score, mean_squared_error
from sklearn.model_selection import train_test_split
import joblib

engine = create_engine(
    ”postgresql://user:password@localhost:5432/mining_db”
)

df = pd.read_sql(”SELECT * FROM ore_stream_data”, engine)

X = df[[”moisture”, ”grinding_energy”, ”particle_size”, ”feed_rate”]]
y = df[”ore_grade”]

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2)

model = RandomForestRegressor(n_estimators=200)
model.fit(X_train, y_train)

y_pred = model.predict(X_test)

r2 = r2_score(y_test, y_pred)
rmse = mean_squared_error(y_test, y_pred, squared=False)

print(f”R²: {r2:.3f}”)
print(f”RMSE: {rmse:.4f}”)

joblib.dump(model, ”ore_model.pkl”)
```

The listing of the platform’ s software code reflects the system architecture, data processing algorithms, automation, management, and service integration modules.

A feature of the developed platform is event logging and traceability (logging + lineage), which ensures reproducibility of results, auditing and simplifies incident analysis.

Automatic reconnection with automatic reconnection and exponential delay, monitoring

loop notification.

These mechanisms increase the reliability of the platform and ensure the stability of data quality for the correct operation of forecasting models.

In operation mode, the platform evaluates the quality of the model and compares the R^2 value with the R^2thr threshold. If the condition is met, the ratio is 12:

$$R^2 < R^2thr \quad (12)$$

The retraining cycle is automatically started: the training sample from the real period is updated, the signs are recalculated, hyperparameters are selected and re-validated. The new version of the model is published in the analytical outline with the previous version saved for rollback. This mechanism translates the platform from static analytics to an adaptive forecasting system that is resistant to data fluctuations and changing production conditions.

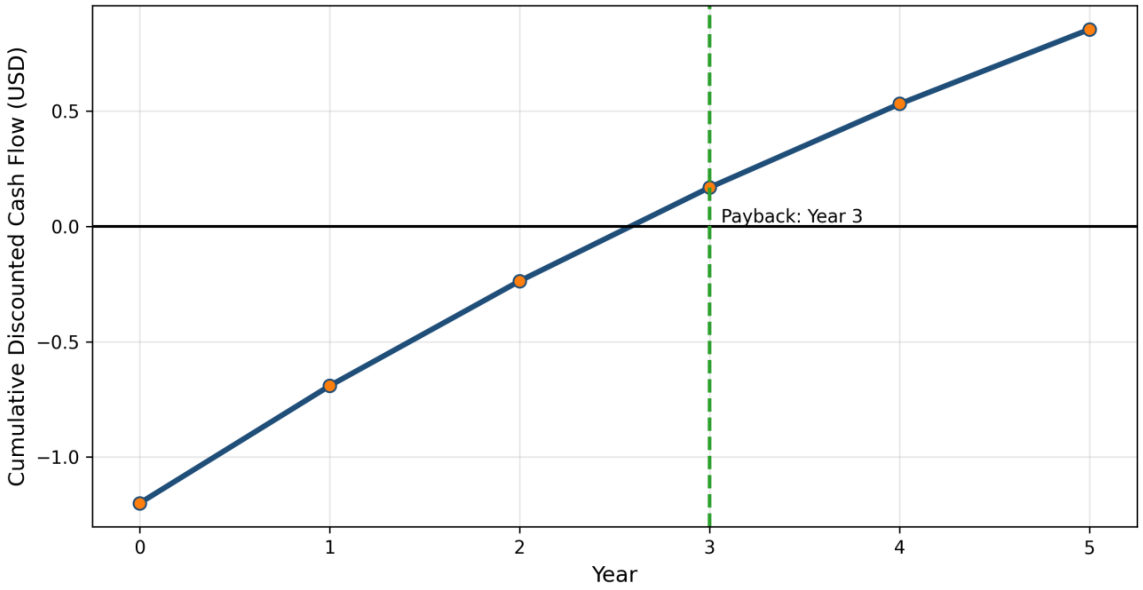


Fig.5 - Disconnect Payback -Ore Data Platform

The evaluation of the statistical stability of the obtained results for 95% confidence intervals of the RMSE metric was performed using the bootstrap estimation formula 13, table 1.

$$\mathrm{CI} = \left[\hat{\theta} - z\frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \hat{\theta} + z\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right] \quad (13)$$

Table 1 -RMSE confidence intervals (95%)

Period	RMSE	95% CI
Before implementation	0.0845	[0.0839; 0.0851]
After implementation	0.0352	[0.0350; 0.0355]

The confidence intervals presented in Table 1 show a statistically significant decrease in the standard error of the forecast.

The diagram in Fig.6 shows an estimate of the spread of the RMSE metric, a narrowing of the confidence interval after the implementation of the platform indicates an increase in the stability of the model and a decrease in the variability of the error.

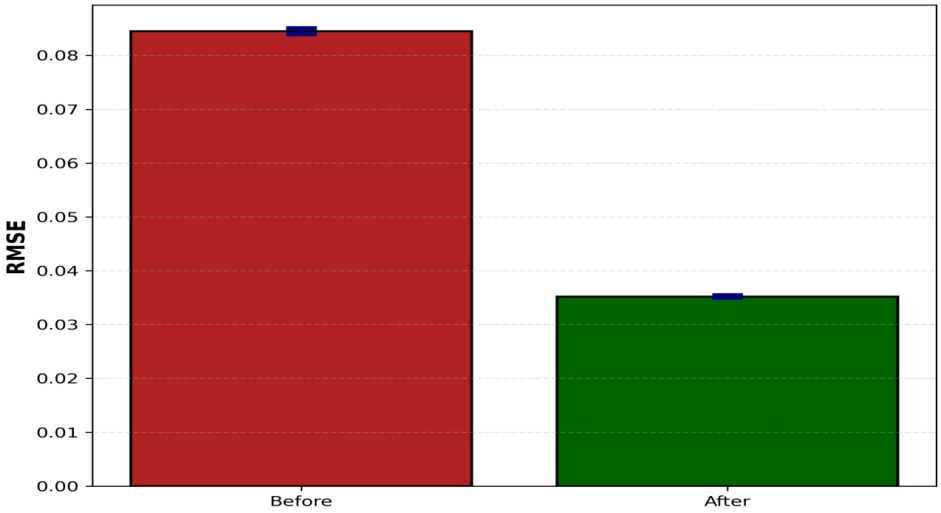


Fig.6 - RMSE with confidence intervals (95%)

The testing of the platform on a sample of 42,000 observations with a sampling time of 1 minute demonstrates a significant increase in the accuracy of the predictive model of the copper content in the ore. At the same time, the coefficient of determination, formula 14, increased, and the root-mean-square error decreased by more than two times. The calculation of confidence intervals confirmed the statistical significance of the results obtained; the stability of the forecast makes it possible to reduce the variability of the technological regime, reduce the processing of substandard batches, and increase the efficiency of ore flow management.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (14)$$

In the table.2 presents quantitative indicators of the accuracy of the forecast model of the copper content in the ore before and after the implementation of the platform. The coefficient of determination demonstrates an increase in the proportion of the explained variance, which indicates a more complete consideration of technological factors. The decrease in RMSE and MAE reflects a decrease in the average and standard deviations of the forecast.

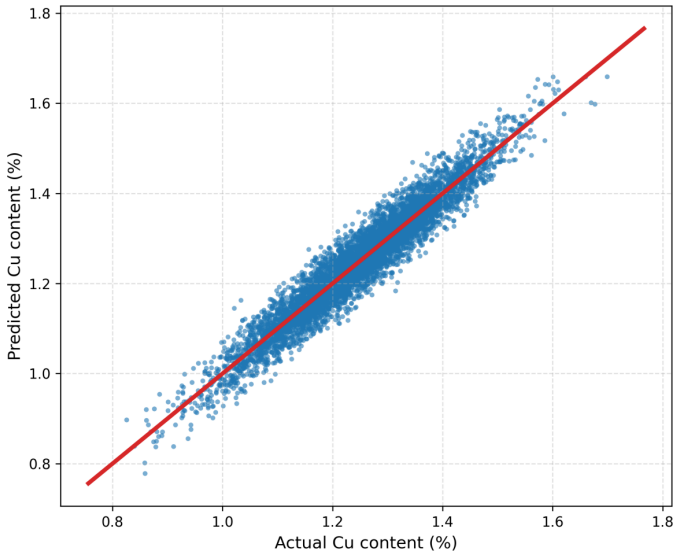


Fig.7 - Predicted vs Actual (after implementation)

The scattering diagram in Fig.7 shows a dense concentration of points along the line of perfect alignment-this indicates a high degree of coincidence of the actual and predicted values of the copper content. The minimal deviation of the points from the diagonal showed a decrease in the random component of the error. There is a narrowing of the scattering cloud compared to the period before the introduction, which ensured the stabilization of the digital control loop.

Table 2 - Model quality metrics

Metric	Before	After
R^2	0.497	0.913
RMSE	0.0845	0.0352
MAE	0.0674	0.0280

The histogram in Fig.8 shows a wide range of forecast errors before the introduction of the platform with high variability, significant deviations and instability of the technological regime of ore processing, and an increase in the processing of substandard batches.

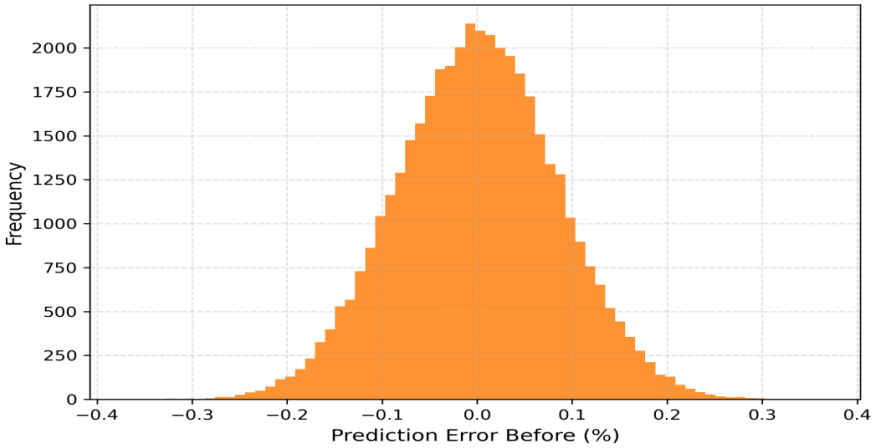


Fig.8 - Error distribution before implementation

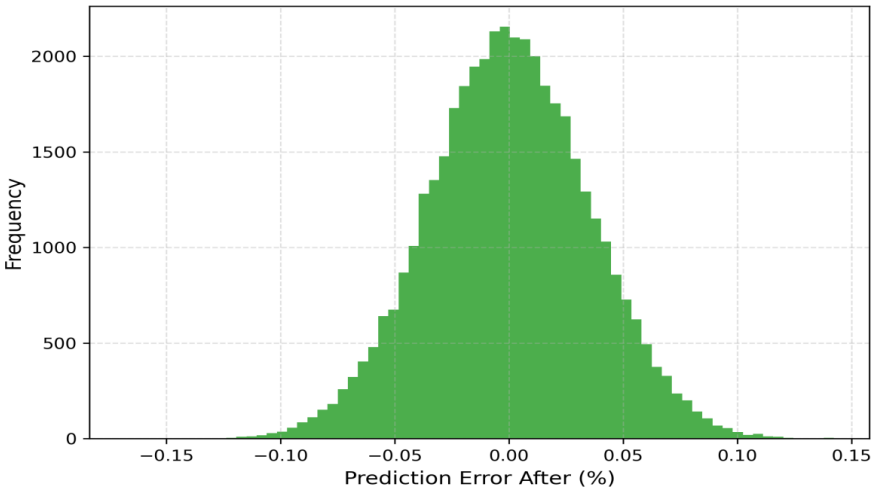


Fig.9 - Error distribution after implementation

After the implementation of the platform, the error distribution narrows significantly, the shape of the distribution becomes more symmetrical, concentrated around the zero value of Fig.9., which indicates a decrease in the systematic component of the error, increasing the stability of the model.

The diagram in Fig.10 shows a twofold reduction in the root-mean-square error after the introduction of the digital platform with a significant improvement in the quality of copper content forecasting and an increase in the efficiency of technological management of the ore flow.

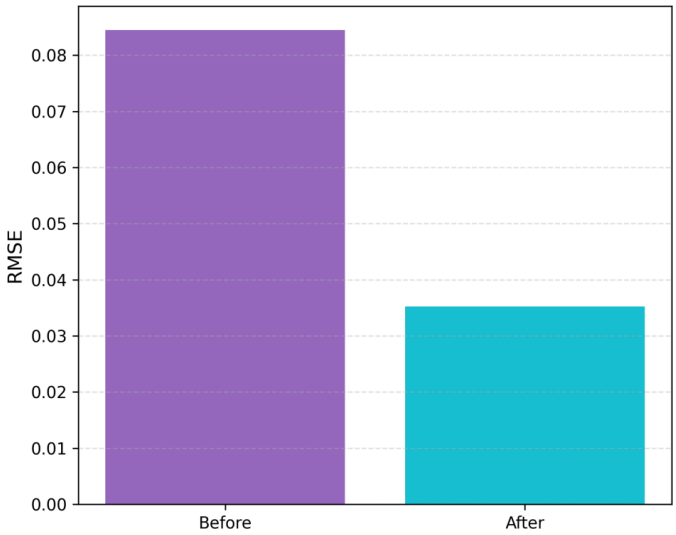


Fig.10 - Decrease in RMSE

The object of the production circuit is ore (an intermediate product), in this regard, the economic effect is estimated not through the ”ore price”, but through a reduction in unit processing costs and losses associated with quality instability, downtime, overspending of energy / reagents and the processing of substandard batches. The calculation was performed according to two scenarios (conservative and basic).

Formula 15, annual gross economic effect due to reduction of unit costs:

$$E_g = k \cdot V \cdot \Delta c \tag{15}$$

where

E_g is the gross effect, USD/year; *k* is the share of the volume covered (0...1); *V* is ore processing, t/year; *Δc* is cost savings, USD/t.

Formula 16 is the annual net economic effect, taking into account operating costs:

$$E_n = E_g - \text{OPEX} \tag{16}$$

where

E_n is the net effect, USD/year; OPEX is the operating costs for maintenance, licenses and infrastructure.

Formula 17 Cash flows of the project:

$$CF_0 = -\text{CAPEX}, \quad CF_t = E_n \quad (t = 1 \dots T) \tag{17}$$

where

CAPEX is the initial investment; *CF_t* is the cash flow per year *t*; *T* is the calculation horizon, years.

Formula 18 is the Net present value (NPV):

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \tag{18}$$

where

r is the discount rate; t is the year number. A positive NPV confirms the economic feasibility of the implementation.

Formula 19 Discounted payback period (PP)^

$$PP = \min\left\{ t : \sum_{i=0}^{t} \frac{CF_i}{(1+r)^i} \geq 0 \right\} \quad (19)$$

where

PP is the minimum year in which the accumulated discounted flow becomes non negative.

Source data and scenarios table 1.

Table 1 - Scenario parameters and calculation results

The script	V, т/year	k (co-verage share)	Δc, USD/т	CAPEX, USD	OPEX, USD/год	Annual effect (gross), USD	Annual effect (net),USD	NPV, USD	Payback (disk.), year	ROI for 5 year, %
Conser-vative	500000	0.3	0.8	1200000	120000	120000.0	0.0	1200000.0	-	100.0
Basic	1200000	0.4	1.5	1200000	150000	720000.0	570000.0	854722.0	3.0	137.5

The results obtained in Fig.11 show that for the ore contour, the effect is to reduce the specific costs of Δc (energy, downtime, nonconditioning, logistics, and recycling). It is recommended to specify Δc as a conservatively estimated value according to the company' s data, in order to avoid increasing the effect, the coverage coefficient k is used, reflecting the share of volume.

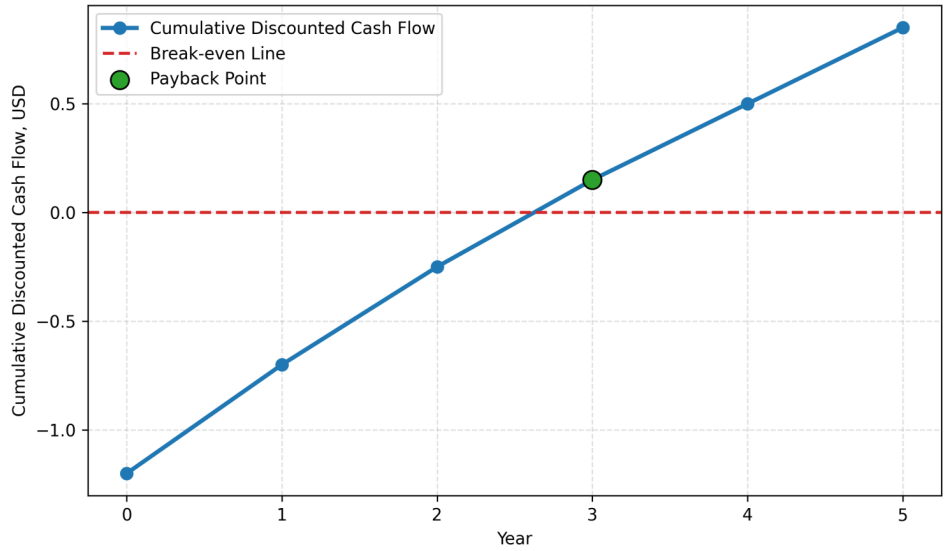


Fig.11 - Payback schedule (accumulated discounted cash flow), "Baseline" scenario

The payback of the implementation of the platform is achieved in the 3rd year, which confirms the financial efficiency and investment feasibility of the implementation of this study.

Conclusion. The testing of the data integration and forecasting platform for processing copper ore was carried out on a sample of 42,000 observations during 10 months of operation. The quantitative indicators showed an improvement in the quality of the predictive model of copper content: the coefficient of determination increased from 0.72–0.75 to 0.91–0.94, the RMS error (RMSE) decreased by more than 2 times, and the confidence intervals (95%) do not overlap-this

confirms the statistical significance of the results obtained.

Qualitative indicators indicate a decrease in the variability of the technological regime, a decrease in the systematic component of the forecast error, an increase in data completeness (up to 96%), and a reduction in the preparation time of the analytical sample by more than 80%. The platform provided stable processing of data streams with minimal latency, built-in skip control mechanisms, and automatic connection restoration.

The practical significance of the work lies in the formation of a digital quality management contour for the ore flow of a mining and metallurgical enterprise in real time. Improving the accuracy of predicting the copper content makes it possible to reduce the processing of substandard batches, stabilize equipment utilization, and reduce unit production costs. The economic calculation of the baseline scenario showed the value of the present value of the net value and the achievement of a payback period within the first or second year of operation.

The scientific novelty of the research consists in the integrated integration of the architecture of streaming data processing, predictive modeling, and an automated model retraining mechanism with a reduction in the coefficient of determination below a threshold value. The developed platform, unlike existing local automation systems, implements an end-to-end cycle ”collection - purification - analytics - feedback”, which allows the system to be adapted to changes in ore flow characteristics.

A promising area of further research is scaling the platform to other stages of the mining and metallurgical cycle, assessing its impact on energy efficiency and the sustainability of technological processes.

Acknowledgement. The research described in the article was conducted within the framework of the initiative project ”Digital twin of the product quality management system at all stages of mining and metallurgical production”.

References

1. Hildebrandt G., Dittler D., Habiger P., Drath R., Weyrich M. Data Integration for Digital Twins in Industrial Automation: A Systematic Literature Review. //IEEE Access. - 2024.- Vol.12.- P.139129 - 139153. DOI 10.1109/ACCESS.2024.3465632.

2. Nobahar P., Xu C., Dowd P., Shirani Faradonbeh, R. (2024). Exploring Digital Twin Systems in Mining Operations: A Review//Green and Smart Mining Engineering. -2024.-Vol.1(4). -P.474-492. DOI 10.1016/j.gsme.2024.09.003.

3. Cacciuttolo C., Atencio E., Komarizadehasl S., Lozano-Galant J. A. Development of an Advanced Multi-Layer Digital Twin Conceptual Framework for Underground Mining//- Sensors. -2025.- Vol.25:6650. DOI 10.3390/s25216650.

4. Freitas N. et al. Data management in industry: concepts, systematic review and future directions //Journal of Intelligent Manufacturing. -2025.-Vol.37.- P.799-827.

DOI 10.1007/s10845-025-02570-z

5. Hramov A.E. et al. Big Data Management and Quality Evaluation for the Industry 4.0 context//Applied Sciences. -2025.-Vol.15(22):11905. DOI 10.3390/app152211905.

6. Vyskočil J. et al. A Digital Twin-Based Distributed Manufacturing Execution System for Industry 4.0 with AI-Powered On-The-Fly Replanning Capabilities //Sustainability. -2023.-Vol.15 (7):6251. DOI 10.3390/su15076251.

7. Galli E. et al. (2023). Literature Review of Integrated Use of Digital Twin and MES in Industry (ISA-95 context). Proc. MOSIM / paper. https://oraprdnt.uqtr.uquebec.ca/portail/docs/GSC6979/

O0005294151_CIGI_QUALITA_MOSIM_2023_paper_9226.pdf?utm_source=chatgpt.com. - Date accessed: 05.01.2026

8. Muñoz M., Torres M. An Internet of Things platform for heterogeneous data integration: Methodology and application examples //Journal of Network and Computer Applications. -2025.-Vol.240:104197. DOI 10.1016/j.jnca.2025.104197.

9. OPC Foundation. OPC Unified Architecture (overview / interoperability for Industry 4.0). 2025. https: //opcfoundation.org/opcua-en.pdf?utm_source=chatgpt.com.- Date accessed: 05.01.2026.

10. Hornsteiner M. et al. Reading between the Lines: Process Mining on OPC UA Network Data// Sensors. -2024.-Vol.24 (14): 4497. DOI 10.3390/s24144497.

11. Merino J., et al. Data Integration for Digital Twins in the built environment based on federated data models //Smart and Sustainable Built Environment. -2023.-Vol.12(3). -P.345–362. DOI 10.1680/jsmic.23.00002.

12. Ayele, E. D., et al. (2024). Emerging Industrial Internet of Things open-source platforms and applocations in diverse sectors//Telecom. -2024.-Vol.5(2). -P.369-399. DOI 10.3390/telecom5020019.

13. Ficili I. et al. From sensors to data Intelligence: Leveraging IoT, Cloud, and Edge Computing with AI.//Sensors. -2025.-Vol.25 (6):1763. DOI 10.3390/s25061763.

Information about the author

Akisheva L.- Nazarbayev Intellectual School, Astana, Kazakhstan, e-mail: lenaraakisheva@gmail.com;

Bayzhomartov N.- 4 th year student, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: somebuddywant@gmail.com.

Сведения об авторах

Акишева Л.- Назарбаев интеллектуальная школа, Астана, Казахстан, e-mail: lenaraakisheva@gmail.com;

Байжомартов Н.- студент 4-го курса, Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан, somebuddywant@gmail.com.

МРНТИ 52.13.07 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1421**

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ЗАПАДНОЙ РУДНОЙ ЗОНЫ РУДНИКА АБЫЗ В ЭТАЖЕ 320÷190 М

[1]А.Б. Жиенбаев, [2]М.А. Жараспаев, [2]М.Ж. Балпанова, [2]А.Т. Карабатырова

[1]ТОО «Корпорация Казахмыс», Жезказган, Казахстан,
[2]ТОО «Научно-технический центр промышленной безопасности», Караганды, Казахстан

Корреспондент-автор: akarabatyrova19@gmail.com

В данной статье представлено комплексное геомеханическое исследование устойчивости горных выработок при отработке Западной рудной зоны (ЗРЗ) рудника Абыз в этаже 320÷190 м. Экономическая целесообразность подземной геотехнологии на данном объекте напрямую зависит от эффективности управления состоянием горного массива, особенно в зонах сопряжений и при повторной разработке запасов. В работе проанализированы физико-механические свойства пород, которые были разделены на три основных домена: от крепких сплошных руд до неустойчивых метасоматитов.

Методология исследования базируется на натурных замерах параметров трещиноватости (742 замера), оценке индекса качества массива RQD и определении природного поля напряжений методом гидроразрыва скважин. С использованием программного обеспечения Dips, Unwedge и RocLab проведено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и выполнена оценка прочности массива по критерию Хука-Брауна. Исследованием установлено, что ведущим механизмом потери устойчивости является кинематическая неустойчивость, проявляющаяся в вывалах структурных блоков, что значительно усиливается воздействием высоких горизонтальных тектонических напряжений, превышающих вертикальные в 1,6 раза. Полученные результаты позволяют с высокой точностью прогнозировать зоны потенциального разрушения и обосновывают необходимость дифференцированного подхода к оценке устойчивости штреков и ортов в зависимости от их ориентации относительно главных систем трещин.

Ключевые слова: устойчивость горных выработок, рудник Абыз, геомеханический мониторинг, трещиноватость массива, показатель RQD, критерий Хука-Брауна, кинематическая неустойчивость, напряженно-деформированное состояние.

АБЫЗ КЕНІШІНІҢ БАТЫС КЕН АЙМАҒЫНЫҢ 320–190 М ДЕҢГЕЙІНДЕГІ ҚОРЛАРДЫ ДАЙЫНДАУ ЖӘНЕ ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ КЕЗІНДЕГІ ТАУ-КЕН ҚАЗБАЛАРЫНЫҢ ОРНЫҚТЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

[1]А.Б. Жиенбаев, [2]М.А. Жараспаев, [2]М.Ж. Балпанова, [2]А.Т. Карабатырова

[1]«Қазақмыс Корпорациясы» ЖШС, Жезқазған, Қазақстан,
[2]«Научно-технический центр промышленной безопасности» ЖШС, Қарағанды, Қазақстан,
e-mail: akarabatyrova19@gmail.com

Бұл мақалада «Абыз» кенішінің Батыс кен аймағын (БКА) 320÷190 м қабатында игеру кезіндегі дайындық тау-кен қазбаларының орнықтылығына жүргізілген кешенді геомеханикалық зерттеу нәтижелері ұсынылған. Аталған объектідегі жерасты геотехнологиясын іске асырудың экономикалық тиімділігі дайындық қазбаларының айналасындағы тау жынысы сілемінің күйін басқару тиімділігіне, әсіресе түйісу аймақтарында және қорларды қайталап өндіру кезінде тікелей байланысты. Жұмыста тау жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттері талданды, олар берік тұтас рудалардан бастап орнықсыз метасоматиттерге дейінгі үш негізгі геомеханикалық доменге бөлінді.

Зерттеу әдістемесі жарықшақтық параметрлерін натурлық өлшеуге (742 өлшем), RQD сілемінің сапа индексін бағалауға және ұңғымаларды гидрожару әдісімен табиғи кернеулер өрісін анықтауға

негізделген. Dips, Unwedge және RocLab бағдарламалық жасақтамасын қолдана отырып, кернеулі-деформациялық күйге математикалық модельдеу жүргізілді және Хук-Браун критерийі бойынша сілемнің беріктігі бағаланды. Зерттеу барысында орнықтылықты жоғалтудың негізгі механизмі құрылымдық блоктардың құлауымен көрінетін кинематикалық орнықсыздық екені анықталды, бұл тік кернеулерден 1,6 есе асатын жоғары көлденең тектоникалық кернеулердің әсерінен айтарлықтай күшейеді. Алынған нәтижелер ықтимал бұзылу аймақтарын жоғары дәлдікпен болжауға мүмкіндік береді және негізгі жарықшақтар жүйесіне қатысты бағытына байланысты штректер мен орттардың орнықтылығын бағалауға сараланған тәсілдің қажеттілігін негіздейді.

Түйін сөздер: Тау-кен қазбаларының орнықтылығы, Абыз кеніші, геомеханикалық мониторинг, сілемнің жарықшақтығы, RQD көрсеткіші, Хук-Браун критерийі, кинематикалық орнықсыздық, кернеулі-деформациялық күй.

STABILITY RESEARCH OF MINE WORKINGS DURING THE DEVELOPMENT AND MINING TECHNOLOGY OF RESERVES OF THE WESTERN ORE ZONE OF THE ABYZ MINE AT THE 320–190 M LEVEL

[1]A.B. Zhienbaev, [2]M.A. Zharaspaev, [2]M.Zh. Balpanova, [2]A.T. Karabatyrova

[1]"Kazakhmys Corporation" LLC, Zhezkazgan, Kazakhstan,
[2]"Scientific and Technical Center for Industrial Safety" LLC, Karaganda, Kazakhstan,
e-mail: akarabatyrova19@gmail.com

This article presents the results of a comprehensive geomechanical study on the stability of development workings during the exploitation of the Western Ore Zone of the Abyz mine at depths of 190–320 m. The relevance of the work is driven by the need for scientific justification of the reasons for the violation of design contours of workings under conditions of a complex natural stress field and intensive rock mass jointing. In the course of the work, a detailed analysis of the physical and mechanical characteristics of rocks was carried out, which were classified into three main geomechanical domains: from strong massive ores to weak metasomatites.

The research methodology is based on in-situ measurements of fracturing parameters (742 measurements), assessment of the Rock Quality Designation (RQD) index, and determination of the natural stress field using the hydraulic fracturing method. Using Dips, Unwedge, and RocLab software, mathematical modeling of the stress-strain state was performed, and the strength of the rock mass was assessed according to the Hoek-Brown criterion. The study established that the leading mechanism of stability loss is kinematic instability, manifested in the fallouts of structural blocks, which is significantly enhanced by the impact of high horizontal tectonic stresses exceeding vertical ones by 1.6 times. The results obtained allow for high-accuracy prediction of potential failure zones and justify the need for a differentiated approach to assessing the stability of drifts and crosscuts depending on their orientation relative to the main joint systems.

Keywords: stability of mine workings, Abyz mine, geomechanical monitoring, rock mass jointing, RQD index, Hoek-Brown criterion, kinematic instability, stress-strain state.

Введение. Актуальность исследования устойчивости горных выработок на руднике Абыз обусловлена необходимостью обеспечения промышленной безопасности и экономической эффективности подземных горных работ при повторной и углублённой отработке запасов в сложных горно-геологических условиях. В пределах Западной рудной зоны (ЗРЗ) формируются неблагоприятные сочетания интенсивной трещиноватости, выраженной анизотропии природного поля напряжений и резкого контраста физико-механических свойств пород, что приводит к систематическим нарушениям проектных контуров выработок и значительным поте-

рям подготовительных горных выработок.

Анализ опыта эксплуатации подземных выработок на руднике Абыз показывает, что традиционные подходы к оценке устойчивости, основанные преимущественно на прочностных характеристиках пород и эмпирических классификациях массива, не в полной мере отражают реальные механизмы разрушения в условиях развитой структурной неоднородности и тектонически обусловленных горизонтальных напряжений. В особенности это проявляется в зонах сопряжений выработок и при проходке в направлениях, неблагоприятно ориентированных относительно основных систем трещин.

Объектом исследования является горный массив Западной рудной зоны рудника Абыз в интервале глубин этажа 320÷190 м, характеризующийся наличием сближенных рудных тел, метасоматически изменённых пород и сложной тектонической нарушенности.

Предметом исследования являются процессы деформирования и разрушения горных выработок под воздействием структурных факторов трещиноватости и анизотропного природного поля напряжений.

Целью работы является обоснование параметров устойчивости горных выработок на основе комплексного анализа физико-механических свойств пород, характеристик трещиноватости массива и параметров природного напряжённого состояния.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- геомеханическое районирование массива с выделением доменов, различающихся по прочностным и деформационным характеристикам;

- картирование и статистический анализ систем трещин с оценкой их влияния на кинематическую устойчивость выработок;

- определение показателя качества массива RQD и геологического индекса прочности GSI;

- анализ природного поля напряжений и его анизотропии на основе данных натурных измерений;

- математическое моделирование механизмов неустойчивости горных выработок.

Гипотеза исследования заключается в том, что доминирующим механизмом потери устойчивости горных выработок в пределах Западной рудной зоны является кинематическая неустойчивость, обусловленная перемещением структурных блоков по системам трещин, усиленная действием высоких горизонтальных тектонических напряжений, превышающих вертикальные.

Научная значимость работы состоит в формировании уточнённой геомеханической модели участка недр, учитывающей совместное влияние структурной неоднородности массива и анизотропного напряжённого состояния, что позволяет повысить достоверность прогнозирования зон потенциальных разрушений и обосновать дифференцированный подход к оценке устойчивости выработок различной ориентации.

Материалы и методы. *Характеристика объекта исследования*. Объектом исследования является горный массив Западной рудной зоны (ЗРЗ) месторождения Абыз в интервале глубин этажа 320÷190 м. Данный участок характеризуется сложными горно-геологическими условиями, обусловленными наличием сближенных рудных тел и интенсивной тектоникой. Золото-колчеданно-полиметаллическое оруденение локализовано в пределах субмеридиональной тектонической зоны метасоматитов серицит-кварцевого и хлорит-кварц-серицитового состава, развитых по вулканогенно-осадочным породам нижнего девонах [1].

Важной особенностью объекта является морфология рудной зоны: мощность зоны метасоматитов достигает 100–200 м, при этом линзы сплошных руд массивной текстуры, как правило, окаймляются вкрапленными рудами, развитыми преимущественно в лежачем боку. Общее простирание толщи пород и тектонических разломов - субмеридиональное, падение - западное, изменяющееся от крутого (70°) до пологого.

Рудник Абыз отрабатывает две рудные зоны: Восточная - с 2005 г. сначала карьером, с 2015 г. - шахтой; Западная - с 2021 г. подземным способом системой поэтажного обрушения (рис.1).

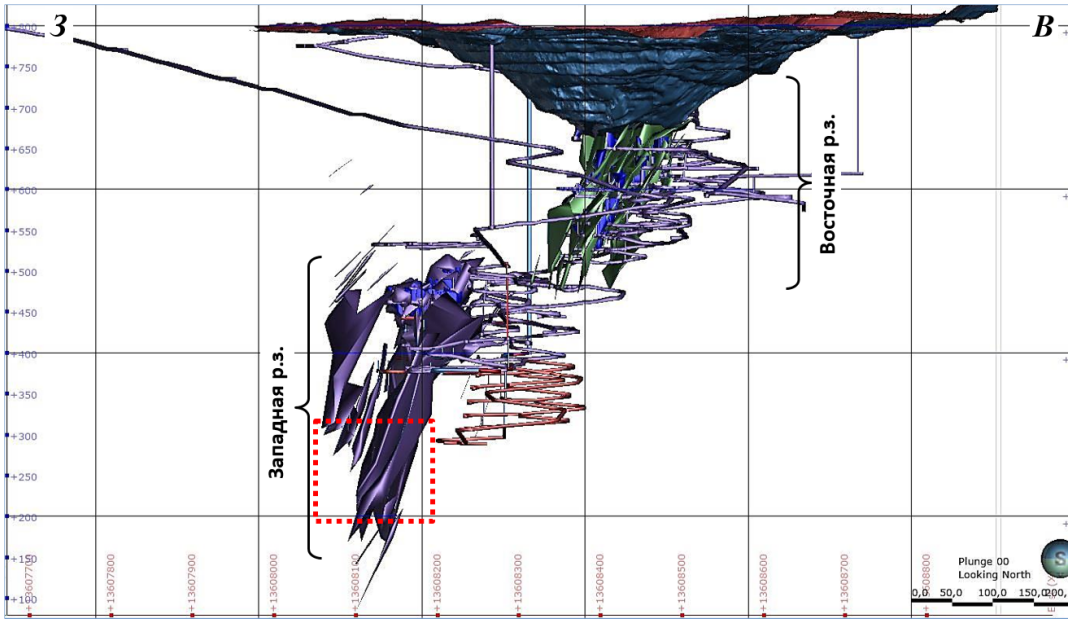


Рис.1 - Рудные зоны месторождения Абыз в разрезе З – В.
Этаж 320÷190 м выделен красным пунктиром

Методология и этапы исследования. Научная методология работы базируется на комплексном подходе, включающем натурные измерения, лабораторные испытания и математическое моделирование.

Определение ключевых механизмов потери устойчивости выработок в условиях анизотропного поля напряжений и дискретной трещиноватости массива для прогнозирования зон обрушений.

Основной формой потери устойчивости в исследуемом интервале глубин является сочетание кинематического перемещения структурных блоков по трещинам с воздействием высоких горизонтальных тектонических напряжений, превышающих вертикальные нагрузки.

Этапы исследования:

- геомеханическое районирование: Классификация породного массива на домены на основе физико-механических свойств;

- структурный анализ: Картирование систем трещин методом линейной съемки и статистическая обработка данных;

- оценка качества массива: Определение рейтинга RQD (Rock Quality Designation) по керну и обнажениям;

- анализ напряженного состояния: Измерение природного поля напряжений методом гидроразрыва и расчет локальных концентраций напряжений вокруг выработок;

- математическое моделирование: Расчет параметров кинематической устойчивости (клиновидных вывалов) и оценка прочности массива по критерию Хука-Брауна;

- описание методов и инструментария.

Для получения достоверных данных использовались следующие методы и программные комплексы:

- натурные измерения трещиноватости: Проведена линейная съемка методом массовых замеров. Всего обработано 742 замера элементов залегания трещин и тектонических разломов на подэтажах 590÷340 м;

- оценка RQD: Выполнена двумя независимыми методами: линейной съемкой частоты трещин (FF - Fracture Frequency) по стенкам выработок (98 интервалов общей длиной 500 м) и геомеханическим описанием керна 8 разведочных скважин (69 интервалов). Расчет RQD по стенкам выработок производился по формуле Приста-Хадсона, учитывающей экспоненциальный закон распределения расстояний между тре-

щинами [2];

- определение напряжений: Использован метод гидроразрыва пласта (hydraulic fracturing) в скважинах. Замеры производились на двух станциях (глубины 408 м и 275 м) для выявления градиента напряжений с глубиной.

Математическое моделирование и ПО.

- программа Dips использовалась для статистической обработки ориентировок трещин и выделения главных систем (стереографические проекции);

- программа RocLab применялась для расчета прочности трещиноватого массива по критерию Хука-Брауна [3] и определения геологического индекса прочности GSI;

- программа Unwedge использовалась для моделирования кинематической неустойчивости (построения призм обрушения) в зависимости от ориентации выработок [4].

Обсуждение и результаты. *Физико-механические свойства и геомеханическая доменизация.*

Анализ лабораторных испытаний проб руд и пород позволил выделить три основных геомеханических домена, существенно различающихся по своим прочностным характеристикам. Это разделение критически важно для понимания дифференцированного поведения выработок.

Домен 1 (Сплошные руды и неизмененные породы): характеризуется высокой прочностью. Средняя прочность на одноосное сжатие (UCS) составляет 110 МПа с коэффициентом вариации 12%. Массив данного домена является жестким (модуль деформации массива E_m = 22 ГПа) и, как правило, устойчивым

Домен 2 (Слабоизмененные породы): включает вулканогенно-осадочные породы, удаленные от рудной зоны. Средняя прочность UCS снижается до 63 МПа.

Домен 3 (Метасоматиты и вкрапленные руды): представляет собой ”рубашку” вокруг рудных тел, состоящую из серицитовых и хлоритовых метасоматитов. Данный домен является наименее устойчивым: средняя прочность UCS составляет всего 37 МПа, при этом коэффициент вариации достигает 30%, что указывает на высокую неоднородность.

Сравнительный анализ показывает, что прочность сплошных руд в 6 раз превышает прочность вмещающих метасоматитов, а жесткость массива — в 22 раза. Геологически это формирует структуру, где жесткие включения (рудные тела) заключены в податливую, пластичную матрицу метасоматитов, склонных к размоканию. Подобная контрастность свойств характерна для многих месторождений Рудного Алтая и является ключевым фактором перераспределения напряжений.

Структурный анализ трещиноватости массива.

Трещиноватость является определяющим фактором устойчивости на исследуемых глубинах. Обработка 742 замеров в программе Dips (рис.2). позволила выявить четыре основные системы трещин.

Наиболее распространены и ярко выражены крутопадающие трещины системы 1 со средним азимутом падения DipDir = 265° и углом падения Dip = 68° на запад, согласные с простиранием (Strata Strike) и падением (Strata Dip) всей толщи пород и рудных зон. Продольно секущая система трещин 2 имеет обратное падение на восток со средним азимутом 85° и углом падения 69°. Выделены система 3 не часто встречающихся пологих трещин со средним углом падения 12° и азимутом 266°. Скорее всего, система 3 пологих трещин связана с пологими разломами, по которым произошли сдвиги и ЗРЗ «отъехала» на запад от ВРЗ. Система 4 поперечно секущих трещин имеет средний азимут падения 85° и угол падения 69°.

Длины трещин и расстояния между ними имеют обратно экспоненциальный закон распределения. По 393 замерам средняя длина трещин 4,0 м; среднее расстояние между трещинами (по 346 замерам) - 1,2 м.

Важной характеристикой для оценки сопротивления сдвигу является состояние поверхности трещин.61% трещин имеют шероховатые по-

верхности (Jr = 4), однако 56% из них заполнены размягчающимся глинистым материалом (Ja = 4), что существенно снижает сцепление по контактам блоков. Средневзвешенный показатель шероховатости Jr составляет 3,2, а показатель изменения стенок трещин Ja - 2,62. Эти параметры были использованы для расчета индекса GSI по формуле [5]:

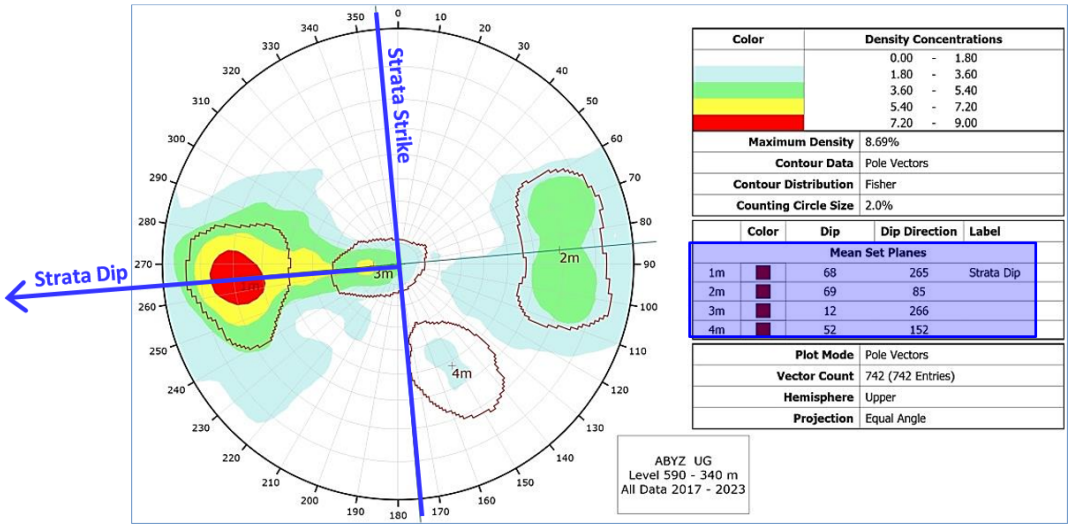


Рис.2 - Полярная диаграмма трещиноватости массива на руднике Абыз. Средние углы падения (Dip) и азимуты падения (Dip Direction) систем трещин (Mean Set Planes) в таблице выделены синим

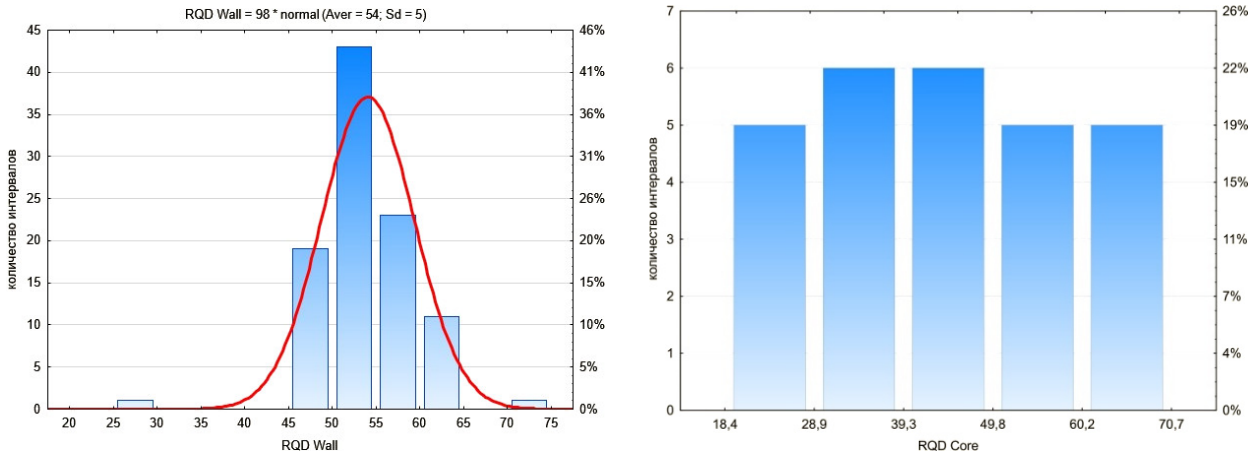


Рис.3 - Распределения RQD по результатам линейной съемки по стенкам выработок (слева) и по описанию керна (справа)

$$GSI = \frac{52\frac{J_r}{J_a}}{(1+\frac{J_r}{J_a})} + \frac{RQD}{2}$$

Оценка качества массива (RQD) и его вариативность.

Исследования выявили высокую неоднородность массива по показателю RQD. По данным линейной съемки в выработках распределение RQD близко к нормальному со средним значением 54%. Однако данные кернового бурения показывают более широкий разброс значений - от 18% (в зонах тектонических нарушений) до 70%, со средним значением 45% и высоким коэффициентом вариации (35%).

Для моделирования были приняты дифференцированные значения:

- для сплошных руд и окварцованных пород: RQD = 54% (средняя трещиноватость);

- для хлорит-серицитовых метасоматитов («рубашки»): RQD = 30% (сильная трещиноватость).

Это подтверждает, что метасоматическая зона представляет собой не только менее прочную, но и значительно более раздробленную среду.

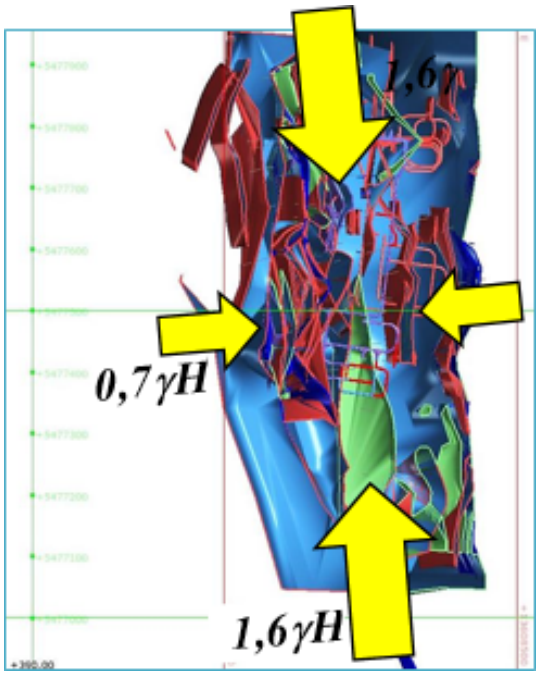


Рис.4 - Природное напряженное состояние массива на руднике Абыз по данным натурных измерений методом гидроразрыва скважин

Природное поле напряжений и его анизотропия.

Одним из ключевых результатов исследования стало определение параметров тензора естественных напряжений. Установлено, что напряженное состояние массива является существенно анизотропным и тектоническим по своей природе.

Максимальное напряжение (σ_1) ориентировано горизонтально по простиранию рудных зон и составляет 1,6 Н (Н- глубина от поверхности).

Вертикальное напряжение (σ_2) соответствует гравитационной нагрузке (σ_2=Н).

Минимальное напряжение (σ_3) действует горизонтально вкрест простирания и составляет 0,7 Н.

Таким образом, коэффициент бокового распора по простиранию (λ_1 = 1,6) более чем в два раза превышает коэффициент вкрест простирания (λ_3 = 0,7). Эта выраженная анизотропия предопределяет различный характер разрушения выработок разной ориентации.

Анализ механизмов неустойчивости. Кинематическая неустойчивость (Вывалы блоков)

Моделирование в программном комплексе Unwedge (рис.6, рис.7), базирующееся на пересечении выявленных систем трещин (1, 2 и 4), показало, что доминирующим механизмом разрушения является гравитационное обрушение структурных блоков (клиновидные вывалы рис.5).



Рис.5 - Клиновидный вывал в вент. штреке гор.490 м

Результаты расчетов вывалов в выработках разных направлений приведены на рис.7. На этих графиках по горизонтальной оси используется угол встречи Δ между азимутом простирания толщи пород и азимутом проходки выработки. При проходке выработки с отклонением от простирания в висячий бок угол Δ имеет знак (+); в лежачий бок - знак (-).

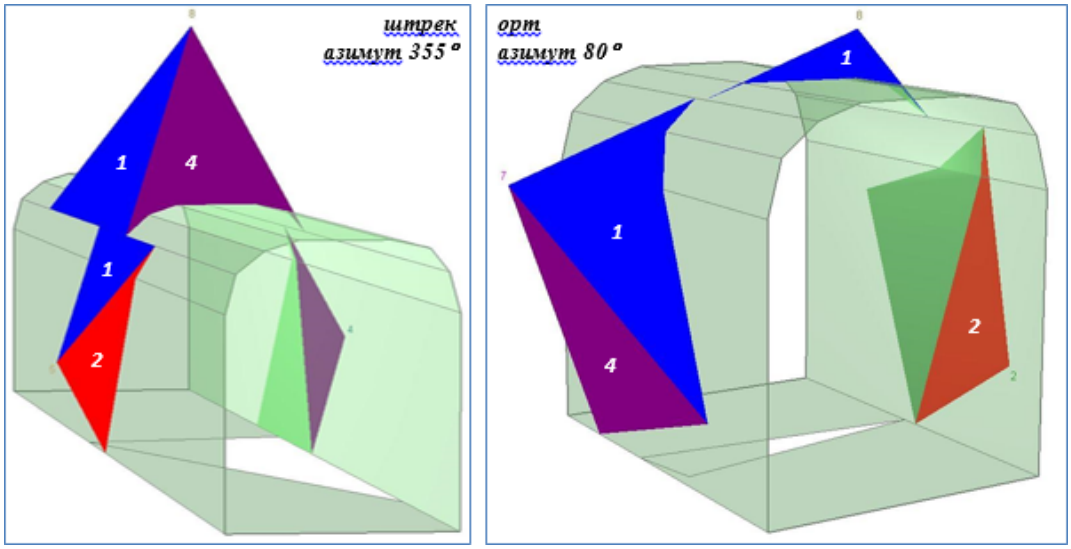


Рис.6 - Геометрия возможных вывалов в штреках (слева) и ортах (справа) по трещинам (см. рис.2): 1 - наиболее развитой системы, согласной с залеганием рудных тел и всей толщи пород; 2 - продольно секущей системы с обратным падением; 4 - поперечно секущей системы

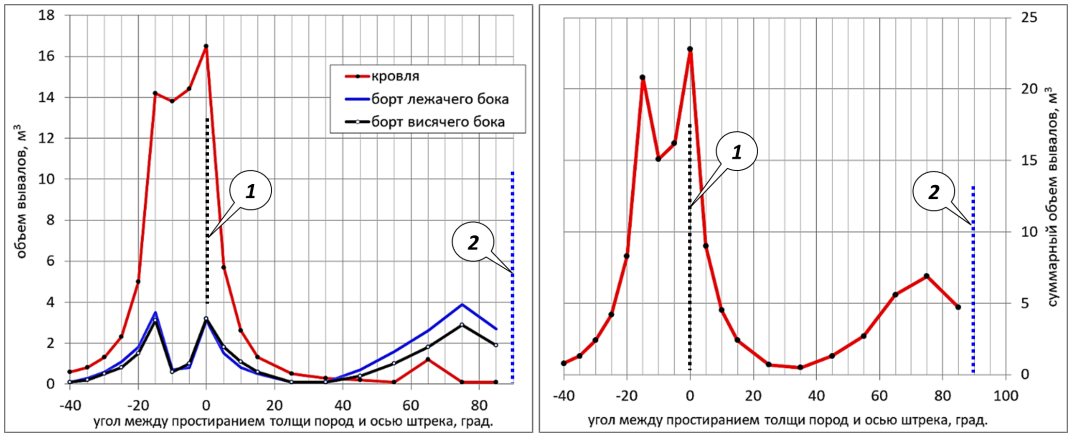


Рис.7 - Объемы вывалов (слева - по месту образования; справа - суммарные) в выработках разных направлений: 1 - в штреках по простиранию толщи пород (Δ = 0°); 2 – в ортах вкрест простирания, по падению толщи пород (Δ =90°)

Результаты анализа ориентации выработок выявили четкие закономерности:

- штреки (по простиранию): при совпадении оси выработки с простиранием рудных тел (угол встречи $\Delta \leq 0 \pm 15°$) наблюдается максимальный риск обрушения крупных блоков из кровли. Это обусловлено подсечкой крутопадающих трещин системы 1 и 2 вдоль длинной оси выработки;

- орты (вкрест простирания): при проходке вкрест простирания риск вывалов из кровли минимизируется, однако возникает вероятность сдвижения блоков с бортов выработки;

- оптимальная ориентация: наименьшие объемы расчетных вывалов наблюдаются при углах встречи оси выработки с простиранием структур в диапазоне 20°÷70°.

Важно отметить, что моделирование без масштабирования трещин предсказывает возможность формирования особо крупных вывалов при неблагоприятном пересечении длинных магистральных трещин, что подтверждается практикой (наблюдались вывалы высотой до 4–5 м).

Стресс-индуцированная неустойчивость (Раздавливание)

Для оценки риска разрушения под действием сжимающих напряжений был выполнен расчет концентрации напряжений на контуре выработок с использованием решения Кирша [6]. Максимальные напряжения на контуре *maxσ* определяются по формуле:

$maxσ = γH(3 - λ_3) = 2,3γH.$

где λ - коэффициенты концентрации.

Расчеты для горизонта 320–190 м показали критическую разницу для выработок разной ориентации:

- в штреках (вдоль $σ_1$) максимальные напряжения концентрируются в бортах и составляют *maxσ* ~2,3Н (до 38 МПа на глубине 610 м);

- в ортах (вкрест *σ1)* максимальные напряжения возникают в кровле и достигают экстремальных значений *maxσ* ~ 3,8 Н (до 63 МПа) [7].

Сравнивая действующие напряжения с прочностью массива ($σ_m$), можно сделать вывод, что в кровле ортов напряжения на 66% выше, чем в бортах штреков.

При прочности массива метасоматитов $σ_m$ ~6 МПа (табл.2), условие *maxσ*~ $σ_m$ выполняется с большим запасом, что прогнозирует процессы раздавливания и пластического течения пород в кровле поперечных выработок, что согласуется с современными представлениями об инициации разрушения хрупких горных пород в условиях концентрации напряжений [8].

Таблица 1 - Свойства разных типов трещиноватых массивов (доменов)

Домены		UCS	J_r	J_a	RQD	GSI	m	$σ_m$	E_m
1	руды сплошные, туфы, песчаники и другие неизмененные породы	110	4,0	0,75	54	70	17	38	22
2	слабоизмененные вулканогенно-осадочные породы разных типов	63	3,2	2,6	45	50	17	14	6
3	слабые метасоматиты серицитовые, хлоритовые, вкрапленные руды	37	2,0	4,0	30	32	19	6	1

UCS - прочность руды / пород при сжатии в образце, МПа; m – показатель Хука, характеризующий тип породы;

$σ_m$ *- прочность трещиноватого массива при сжатии, МПа;* E_m *– модуль деформации трещиноватого массива, ГПа.*

Валидация модели фактическими данными. Анализ фактического состояния горных выработок полностью подтверждает теоретические и модельные построения.

За период эксплуатации подземного рудника из-за обрушений потеряно 1693 погонных метра выработок, что составляет значительный экономический ущерб. Доминирование записей ”Обрушение” в актах обследования (табл.2) коррелирует с прогнозом высокой кинематической неустойчивости.

Таблица 2 - Бросовые выработки на руднике Абыз на 01.03.2024 г.

Горизонт	**Выработки (в скобках длина в п.м.)**	**Итого (п.м.)**
I. Обрушение		1693
657	БПШ-1 (35), БПШ-4 бис (15), БДШ-1 (70), БПШ-5 бис (45)	165

640	БПШ-10 (60), БПШ-8 (55), БПШ-5 (40), БПШ-4 (35), БПШ-1 (75), БПШ-2 (30), БПШ-3 (25)	320
Склад ВМ	Склад ВМ (110)	110
623	ОРТ-3 (55), РШ-2 (15), Заезд-1 (15)	85
607	БПШ-2 (125)	125
540	РШ-1 (44), РШ-2 (33), РШ-3 (23)	100
457	БПШ-6 (48), ОРТ-3 (20)	68
440	БПШ-1 (25)	25
423	Заезд на БПШ-4 (20), БПШ-8 (30), ВОШ (25), БПШ-3 (66)	141
406	БПШ-7 (38), БПШ-5 (30), БПШ-5 бис (48), БПШ-4 бис (48), БПШ-6 бис (4)	168
390	БПШ-2 (47), БПШ-4 (31), БПШ-1 (76), БПШ-3 (29), БПШ 1бис (15), БПШ-1 (40)	238
373	БПШ-1 (61), Подходной штрек (15), БПШ-1 (16)	92
356	БПШ-1 (9)	9
340	БПШ-1 (19), ОРТ-5 (19), ОРТ-4 (9)	47
II.Неподтверждение руды		848
623	БПШ-11 бис (90)	90
590	БПШ-7 (35), Заезд на ВВ (35), РШ-2 (31), РШ-1 (16), БПШ-5 (211)	328
573	БПШ-1 (11), БПШ-2 (19), БПШ-3 (66), Рудный штрек (78)	174
557	Заезд на п/э 557 м. (22)	22
540	Заезд на п/э 540 м. (20)	20
523	Заезд на п/э 523 м. (25)	25
490	БПШ-2 (25)	25
473	БПШ-7 (58)	58
423	БПШ-1 (61)	61
406	РШ-4 (45)	45
Итого по руднику		2541

В актах обследований и при визуальном осмотре фиксируется крупноблочный состав обрушенной массы, что является прямым признаком кинематического механизма (структурной неустойчивости), а не дробления давлением.

Наблюдаемые куполообразные вывалы высотой 1,0–1,5 м (в редких случаях до 5 м) соответствуют геометрии призм обрушения, построенных в Unwedge (рис.9).

Инструментальные замеры показали, что средний перебор сечения составляет 3,3 м² (23% от проектного), что свидетельствует о самопроизвольном обрушении приконтурного массива сразу после взрывных работ до момента установки крепи [9]. Это указывает на мгновенную реализацию упругой энергии и раскрытие трещин в условиях высоких напряжений. Результаты 48 промеров приведены на рис.10.

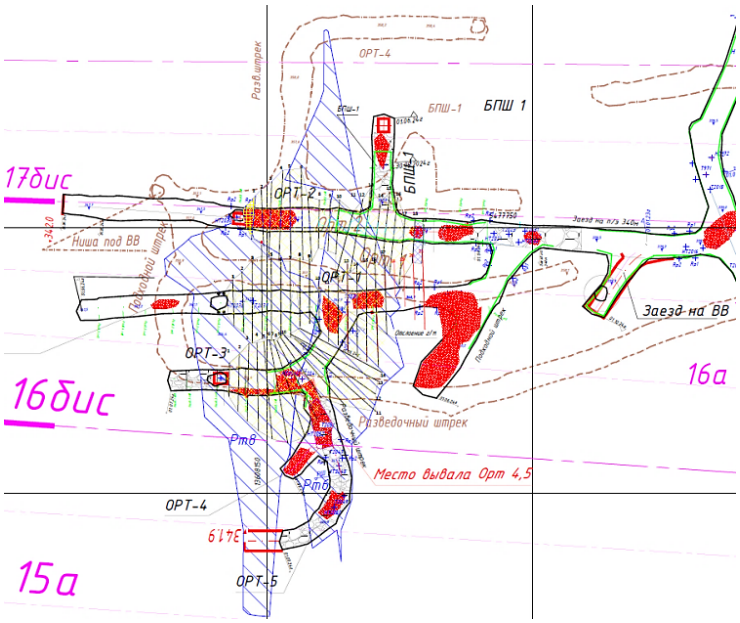


Рис.8 - Вывалы горной массы в БПО п/э 340 м ЗРЗ



Рис. 9 - Клиновидные вывалы с бортов и кровли БПШ-1 на п/э 390 м в сплошной медной колчеданной руде

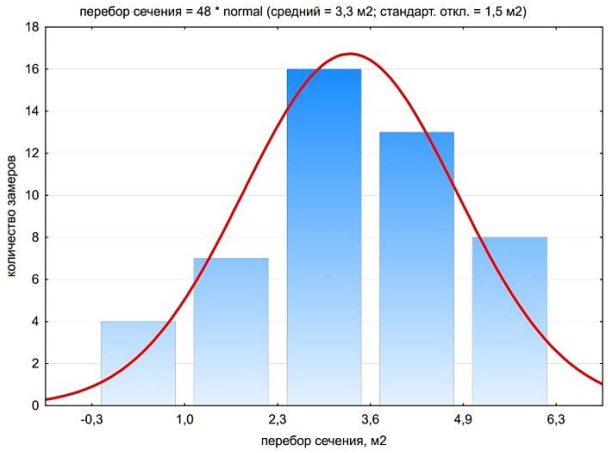


Рис.10 - Распределение площадей переборов сечений выработок

Установленные параметры переборов и объемы обрушений являются основанием для корректировки существующих паспортов крепления в соответствии с действующим Регламентом применения горных мер обеспечения устойчивости [10].

Выводы. Установлено, что в пределах Западной рудной зоны рудника Абыз в интервале глубин этажа 320–190 м определяющим механизмом потери устойчивости горных выработок является кинематическая неустойчивость, реализующаяся в форме гравитационных вывалов структурных блоков, ограниченных системами естественных трещин. Данный механизм доминирует над разрушением, обусловленным превышением прочности массива при сжатии.

Показано, что кинематическая неустойчивость существенно усиливается в зонах метасоматически изменённых пород, формирующих «рубашку» вокруг рудных тел, для которых ха-

рактерны низкие значения показателя качества массива (RQD ≈ 30%), высокий уровень структурной нарушенности и наличие размягчающего глинистого заполнителя в трещинах (Ja = 4). В этих условиях даже при умеренных напряжениях реализуются крупноблочные вывалы.

Экспериментально подтверждено наличие выраженного анизотропного тектонического поля напряжений, при котором максимальное горизонтальное напряжение ориентировано по простиранию рудной зоны и превышает вертикальное в 1,6 раза. Такая конфигурация напряжённого состояния формирует принципиально различный характер нагружения выработок в зависимости от их пространственной ориентации.

Установлено, что для ортов, пройденных вкрест простирания рудных тел, в кровле формируются экстремальные концентрации сжимающих напряжений (до 3,8H), что создаёт предпосылки для раздавливания и пластического течения пород даже в доменах с относительно высокой прочностью. В штреках, ориентированных по простиранию, максимальные напряжения концентрируются преимущественно в бортах и достигают уровня около 2,3H.

Показана прямая зависимость объёмов потенциальных вывалов от угла встречи оси выработки с основными системами трещин. Наиболее неблагоприятным является направление проходки, совпадающее с простиранием пород и рудных тел ($\alpha \approx 0°$), при котором создаются условия для формирования крупных клиновидных вывалов из кровли. Минимальные расчётные объёмы неустойчивых блоков характерны для диапазона углов 20°–70°.

Сопоставление результатов математического моделирования с фактическими данными эксплуатации подтвердило адекватность принятой геомеханической модели: наблюдаемые куполообразные и клиновидные вывалы, значительные переборы сечений (в среднем 23%) и протяжённость потерянных выработок (1693 м) полностью коррелируют с прогнозируемыми зонами кинематической и стресс-индуцированной неустойчивости.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение унифицированных подходов к обеспечению устойчивости горных выработок без учёта структурного фактора и анизотропии напряжений является неэффективным в условиях Западной рудной зоны рудника Абыз. Обоснована необходимость дифференцированного геомеханического подхода, основанного на совместном учёте прочностных характеристик пород, параметров трещиноватости, ориентации выработок и тензора природных напряжений.

Практическая реализация предложенных выводов предполагает корректировку направлений проходки, уточнение паспортов крепления и внедрение инструментального мониторинга деформаций, что позволит снизить риск потери выработок и повысить технико-экономическую эффективность подземной отработки запасов.

Литература

1. Разработка ресурсосберегающей технологии крепления горно-подготовительных выработок в геомеханических условиях месторождения Абыз [док. внутреннего пользования]/ ТОО «Expert PRO». - Усть-Каменогорск, 2023. - 408 с.

2. Hudson J.A., Harrison J.P. Engineering Rock Mechanics. An Introduction to the Principles/ Oxford: Elsevier Science Ltd. -2000. -456 p. ISBN 0-08-041912-7, 0-08-043864-4.

3. Hoek E. Practical Rock Engineering. -2007. -341p. URL: https://www.rocscience.com/learning/hoek-s-corner/books. -Дата обращения: 14.11.2025.

4. Using the Q-system. Rock mass classification and support design: NGI Handbook/Oslo: NGI. -2025. https://www.ngi.no/globalassets/bilder/forskning-og-radgivning/bygg-og-anlegg/q-handbook_2025_english_final.pdf. -Дата обращения: 14.11.2025.

5. Рекомендации по параметрам отработки подкарьерных запасов на руднике Абыз: ГМО № 01-9.4.3.5-9–290 от 04.11.2020. [док. внутреннего пользования]/ТОО «Корпорация Казахмыс». - Караганда, 2020. - 32 с.

6. Макаров А. Б. Практическая геомеханика. - М.: Горная книга, 2006.- 391 с. ISBN 5-98672-038-5.

7. Баклашов, И. В. Геомеханика. В 2 т. Т.1. Основы геомеханики: учебник для вузов. - М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 208 с. ISBN 5-7418-0327-X, ISBN 5-7418-0325-3(Т.1).

8. Diederichs M. S., Kaiser P. K., Eberhardt E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2004.-Vol.41(5). -P.785-812. DOI 10.1016/j.ijrmms.2004.02.003.

9. Мангуш, С. К. Взрывные работы при проведении подземных горных выработок: учебное пособие / С. К. Мангуш. - 2-е изд., стер. - Москва: Издательство МГГУ, 2005. - 120 с. ISBN 5-7418-0114-5.

10. Регламент применения горных мер обеспечения устойчивости выработок на рудниках Корпорации Казахмыс: ГМО № 01–7.10.2.4-9–197 от 27.07.2022 г. [док. внутреннегоего пользования]/ТОО «Корпорация Казахмыс». - Караганда, 2024.

References

1. Razrabotka resursosberegajushhej tehnologii kreplenija gorno-podgotovitel’ nyh vyrabotok v geomehanicheskih uslovijah mestorozhdenija Abyz [dok. vnutrennego pol’ zovanija]/ TOO «Expert PRO». - Ust’-Kamenogorsk, 2023. - 408 s. [in Russian]

2. Hudson J.A., Harrison J.P. Engineering Rock Mechanics. An Introduction to the Principles/ Oxford: Elsevier Science Ltd. -2000. -456 p. ISBN 0-08-041912-7, 0-08-043864-4.

3. Hoek E. Practical Rock Engineering. -2007. -341p. URL: https://www.rocscience.com/learning/hoek-s-corner/books. - Date accessed: 14.11.2025.

4. Using the Q-system. Rock mass classification and support design: NGI Handbook/Oslo: NGI. -2025. https://www.ngi.no/globalassets/bilder/forskning-og-radgivning/bygg-og-anlegg/q-handbook_2025_english_final.pdf. - Date accessed: 14.11.2025.

5. Rekomendacii po parametram otrabotki podkar’ ernyh zapasov na rudnike Abyz: GMO № 01-9.4.3.5-9-290 ot 04.11.2020. [dok. vnutrennego pol’ zovanija]/TOO «Korporacija Kazahmys. - Karaganda, 2020. - 32 s. [in Russian]

6. Makarov A. B. Prakticheskaja geomehanika. - M.: Gornaja kniga, 2006.- 391 s. ISBN 5-98672-038-5. [in Russian]

7. Baklashov, I. V. Geomehanika. V 2 t. T.1. Osnovy geomehaniki: uchebnik dlja vuzov. - M.: Izd-vo MGGU, 2004. – 208 s. ISBN 5-7418-0327-H, ISBN 5-7418-0325-3(T.1). [in Russian]

8. Diederichs M. S., Kaiser P. K., Eberhardt E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2004.-Vol.41(5). -P.785-812. DOI 10.1016/j.ijrmms.2004.02.003.

9. Mangush, S. K. Vzryvnye raboty pri provedenii podzemnyh gornyh vyrabotok: uchebnoe posobie / S. K. Mangush. - 2-e izd., ster. - Moskva: Izdatel’ stvo MGGU, 2005. - 120 s. ISBN 5-7418-0114-5. [in Russian]

10. Reglament primenenija gornyh mer obespechenija ustojchivosti vyrabotok na rudnikah Korporacii Kazahmys: GMO № 01–7.10.2.4-9–197 ot 27.07.2022 g. [dok. vnutrennegoego pol’ zovanija]/TOO «Korporacija Kazahmys». - Karaganda, 2024. [in Russian]

Сведения об авторах

Жиенбаев А.Б. - PhD, заместитель начальника отдела геомеханики, ТОО «Корпорация Казахмыс», Жезказган, Казахстан, e-mail: zhienbaev@list.ru;

Жараспаев М.А. - ведущий специалист, ТОО «Научно-технический центр промышленной безопасности», Караганда, Казахстан, e-mail: zharaspaev_m_a@mail.ru;

Балпанова М. Ж. - PhD, директор ТОО «Научно-технический центр промышленной безопасности», Караганда, Казахстан, e-mail: balpanova86@mail.ru;

Карабатырова А. Т. - ведущий специалист, ТОО «Научно-технический центр промышленной безопасности», Караганда, ККазахстан,e- mail akarabatyrova19@gmail.com.

Information about the authors

Zhienbaev A.B. - PhD, Deputy Head of the Geomechanical Department, ”Kazakhmys Corporation” LLC, Zhezkazgan, Kazakhstan, e-mail: zhienbaev@list.ru;

Zharaspaev M.A. - Leading Specialist, ”Scientific and Technical Center for Industrial Safety” LLC,Karaganda, Kazakhstan, e-mail: zharaspaev_m_a@mail.ru;

Balpanova M. Zh. - PhD, Director, ”Scientific and Technical Center for Industrial Safety” LLC, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: balpanova86@mail.ru;

Karabatyrova A.T. - Leading Specialist, ”Scientific and Technical Center for Industrial Safety” LLC, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: aiger_aiger95@mail.ru.

IRSTI 52.13.25 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1421**

INTEGRATED GEOMECHANICAL APPROACH TO ENSURING THE SAFETY OF UNDERGROUND MINING OF ORE DEPOSITS

[1]S.N. Shaposhnik, [1]D.A. Shokarev, [1]N.V. Matvienko, [1]K.T. Zikirova, [2]Zh.T. Dauletzhanova, [3]A.I. Konurin

[1]LLP «Expert Pro», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
[2]K. Kulazhanov Kazakh university of technology and business, Astana, Kazakhstan,
[3]N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Corresponding-author: Kaliyeva_zhanna@mail.ru

This scientific paper considers an integrated geomechanical approach to ensuring the stability and safety of underground mining operations, combining an assessment of the stress–strain state of the rock mass, rockburst (impact) hazard diagnostics, substantiation of support parameters, the use of backfilling technologies, and the organization of instrumental deformation monitoring. It is shown that the reliability of design solutions is achieved through the joint use of: rock mass quality assessments and empirical schemes for selecting support; computational models of the stress–strain state with an adequate description of rock mass strength; a justified determination of the initial in-situ stress state by methods including hydraulic fracturing; and deformation monitoring for early detection of hazardous trends. Practical recommendations are formulated regarding the minimum dataset and the sequence of geomechanical support throughout the life cycle of an underground facility.

Keywords: geomechanical support, excavation stability, ground pressure management, in-situ tests, deformation monitoring.

ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

[1]С.Н. Шапошник, [1]Д.А. Шокарев, [1]Н.В. Матвиенко, [1]К.Т. Зикирова, [2]Ж.Т. Даулетжанова, [3]А.И. Конурин

[1]ТОО «Expert Pro», Усть-Каменогорск, Казахстан,
[2]Казахский университет технологии и бизнеса имени К. Кулажанова, Астана, Казахстан,
[3]Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт Горного Дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия,
e-mail: Kaliyeva_zhanna@mail.ru

В данной научной статье рассмотрен интегрированный геомеханический подход к обеспечению устойчивости и безопасности подземных горных работ, объединяющий оценку напряжённо-деформированного состояния (НДС) массива, диагностику удароопасности, обоснование параметров крепи, применение закладочных технологий и организацию инструментального мониторинга деформаций. Показано, что надёжность проектных решений достигается при совместном использовании: оценок качества массива и эмпирических схем назначения крепи; расчётных моделей НДС с адекватным описанием прочности массива; обоснованного определения исходного напряжённого состояния методами (включая гидроразрыв); мониторинга деформаций для раннего выявления опасных тенденций. Сформулированы практические рекомендации по минимальному набору данных и последовательности геомеханического сопровождения в жизненном цикле подземного объекта.

Ключевые слова: геомеханическое сопровождение, устойчивость выработок, управление горным давлением, натурные испытания, мониторинг деформаций.

КЕН ОРЫНДАРЫН ЖЕРАСТЫ ӘДІСПЕН ИГЕРУ ҚАУІПСІЗДІГІН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУГЕ АРНАЛҒАН ИНТЕГРАЦИЯЛАНҒАН ГЕОМЕХАНИКАЛЫҚ ТӘСІЛ

[1]С.Н. Шапошник, [1]Д.А. Шокарев, [1]Н.В. Матвиенко, [1]К.Т. Зикирова, [2]Ж.Т. Даулетжанова✉, [3]А.И. Конурин

[1]«Expert Pro» ЖШС, Өскемен, Қазақстан,
[2]Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
[3]Н.А. Ресей ғылым академиясының Сібір бөлімшесі Қытайқал тау-кен институты, Новосибирск, Ресей,
e-mail: Kaliyeva_zhanna@mail.ru

Бұл ғылыми мақалада жерасты тау-кен жұмыстарының орнықтылығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз етуге бағытталған, тау жыныстары массивінің кернеулі-деформацияланған күйін (КДК) бағалауды, соққы қауіптілігін диагностикалауды, бекітпе параметрлерін негіздеуді, закладка (толтырма) технологияларын қолдануды және деформацияларды аспаптық мониторингтеуді біріктіретін интеграцияланған геомеханикалық тәсіл қарастырылған. Жобалық шешімдердің сенімділігі мына компоненттерді бірлесіп қолданғанда қамтамасыз етілетіні көрсетілді: массив сапасын бағалау және бекітпені тағайындаудың эмпирикалық сұлбалары; массивтің беріктігін барабар сипаттайтын кернеулі-деформацияланған күйді есептік модельдеу; бастапқы кернеулі күйді әдістемелік тұрғыдан негізделген анықтау (гидроажырау әдісін қоса алғанда); қауіпті үрдістерді ерте айқындауға арналған деформациялар мониторингі. Жерасты объектісінің өмірлік циклі бойындағы геомеханикалық сүйемелдеудің минималды деректер жиынтығы мен кезеңдік орындалу реттілігі бойынша практикалық ұсынымдар тұжырымдалды.

Түйін сөздер: геомеханикалық сүйемелдеу, тау-кен қазбаларының орнықтылығы, тау қысымын басқару, натуралық сынақтар, деформациялар мониторингі.

Introduction. As mining advances to greater depths, the stability of underground openings is increasingly determined by the combined effects of fracturing, heterogeneity, scale effects, and high levels of natural stresses. Under these conditions, a design solution based on a single method becomes vulnerable: an engineering rock mass classification provides a rapid assessment but does not describe stress redistribution; numerical modeling enables analysis of the stress–strain state but depends on the correctness of the input parameters; in-situ measurements and monitoring provide objective feedback but require interpretation within a unified framework. In practice, a reliable methodology is one in which rock mass quality assessment, determination of the stress state, computational analyses, and deformation control are integrated into a closed-loop support cycle for mining operations.

The aim of this work is to substantiate an integrated approach to ground pressure management and the stability of underground excavations, and to formulate a sequence of actions that ensures consistency between engineering assessments of the rock mass, computational models, and in-situ control data [1–3].

The scientific problem addressed in this study consists in the lack of a unified methodological framework that integrates empirical rock mass classification, numerical modeling, and in-situ monitoring into a consistent decision-making system for underground mining conditions.

The research hypothesis assumes that the reliability of geomechanical support can be significantly improved by implementing a closed-loop integrated approach, where empirical classification, stress–strain modeling, and monitoring data are consistently combined and iteratively refined.

The objectives of the study are:

- to analyze the limitations of existing geomechanical approaches;

- to develop a structured integrated methodology combining empirical, analytical and

observational methods;

- to substantiate the sequence of geomechanical support stages;

to validate the applicability of the proposed approach using comparative analysis of field and calculated data.

Scientific novelty

The scientific novelty of the study lies in:

- the formalization of an integrated geomechanical framework combining empirical, analytical and observational approaches into a unified system;

- the development of a closed-loop methodology for ground pressure management based on continuous feedback between modeling and monitoring;

- the substantiation of a sequential algorithm for geomechanical support throughout the life cycle of underground excavations;

- the integration of rockburst hazard criteria (K1, K2) into a unified interpretation scheme for engineering decision-making.

Materials and methods. The research methodology is based on the integration of three main components:

- empirical assessment of rock mass quality using RQD, RMR, Q-system and GSI for initial classification and zoning;

- analytical and numerical modeling of the stress–strain state using rock mass strength criteria (Hoek–Brown) and deformation parameters derived from empirical correlations;

- insitu measurements and monitoring including hydraulic fracturing for stress determination and instrumental monitoring (e.g., extensometry, TDR).

The methodological framework follows a closed-loop approach:

Rock mass classification → parameter estimation → numerical modeling → in-situ validation → model correction.

This ensures consistency between predicted and observed behavior.

Modern underground geomechanics evolves at the intersection of three lines: engineering classification of the rock mass, computational modeling, and observational control. Historically, empirical methods gained broad acceptance first, because they provide a formalized language for describing the rock mass and make it possible to make decisions under inevitably incomplete initial information. One of the key elements of field description became the rock quality designation index, which translates “visual” fracturing into a quantitative indicator and thereby improves comparability of assessments between sites and observers [3].

Subsequently, empirical methods developed toward rating systems that sought to account not only for the frequency of discontinuities, but also for their engineering significance: surface condition, infilling, weathering, water influence, and the orientation of discontinuities relative to the excavation. This approach enabled a transition from simple “description” to engineering interpretation, where the final rating represents an approximate measure of rock mass quality in the context of excavation stability and support selection [2,4]. A significant step was the development of systems oriented toward support design. In works on rock mass classification for tunnel support design it was shown that rock mass quality can be described as a function of several parameters reflecting blockiness, discontinuity properties, and the influence of water, and then the resulting index can be used to select the support type and intensity [1].

This logic was further developed in directions associated with the Norwegian design school, where the classification index is used as a basis for choosing a combination of rock bolts and shotcrete, with the possibility of updating the assessment as the rock mass is exposed [5]. However, empirical methods have fundamental limitations. First, the final rating depends on the quality of field description and on the consistency of criteria; therefore, methodological discipline and personnel training are required. Second, rating systems inevitably average the rock mass and poorly reflect local “weak spots”: single faults, zones of tectonic reworking, or abrupt changes in lithology. Third, as depth and stress level increase, stability becomes determined not so much by block geometry as by stress redistribution and the development of shear and tensile zones around openings. Therefore, as a rule, an empirical assessment should be treated as the first level

of analysis that defines the initial classification picture and helps rank sites by expected complexity, but does not replace computation and in-situ verification [2].

In literature it is emphasized that empirical methods should be used not as a “tabular replacement of calculations”, but as a tool for primary diagnosis and comparison of sites. In particular, an overview of empirical methods for assessing rock mass condition notes the need to correctly choose an approach for specific conditions and to recognize that any rating system is ultimately a model with a limited domain of applicability [2]. This position is consistent with international practice, where empiricism serves as an “input” for computational parameterization and for observational control.

In underground excavation design, a key problem is the transition from laboratory characteristics of intact rock to rock mass parameters. In the laboratory, the strength and deformability of a monolithic specimen are measured, whereas a rock mass is a system of blocks and discontinuities, and its behavior is determined by the joint action of the matrix and weakness surfaces. To describe rock mass strength, an empirical failure criterion is widely used that accounts for the transition from intact rock to a rock mass by means of the Geological Strength Index. In the early-2000s edition, this criterion became widespread as a unified framework enabling estimation of rock mass strength for different degrees of disturbance and the use of parameters in engineering calculations [6].

This logic was further developed in directions associated with the Norwegian design school, where the classification index is used as the basis for selecting a combination of rock bolting and shotcrete, with the possibility of updating the assessment as the rock mass is exposed [6]. A separate development line is represented by empirical methods specially adapted to mining conditions, where technological factors are present: the influence of blasting, stress changes during extraction, and effects of discontinuity orientation relative to stopes and pillars. For such tasks, a mining rating system was proposed in which the basic rock mass rating is corrected for mining factors; this makes the empirical description more “applied” for design at mining operations [7].

The Geological Strength Index is valuable in that it formally links geological description with computational parameterization. It is “geologically friendly” because it is oriented toward the observable structure and the condition of discontinuities rather than only numerical indices. In the classical work devoted to this index, it is shown that correct assessment of the structural type and the condition of discontinuity surfaces is decisive for deriving rock mass design parameters [8]. At the same time, it is important to understand that parameterization based on the Geological Strength Index and the rock mass failure criterion does not eliminate the need for calibration using in-situ manifestations. Even with careful structural assessment, there remain factors that are difficult to capture “from a picture”: the degree of unloading and damage due to blasting, residual stresses, and local tectonic zones. Therefore, in applied geomechanics, an approach is common in which rock mass damage is introduced through a separate coefficient reflecting technological influence and the quality of mining practice. This idea is methodically formalized in studies devoted to empirical estimation of the rock mass deformation modulus, where along with the Geological Strength Index a disturbance factor is used to account for technology-related effects [9].

To quantitatively describe the deformation behavior of rocks and to subsequently assess brittleness, a “stress–strain” diagram obtained under controlled conditions of uniaxial or triaxial compression is used. Below, the test mode provisions and the processing procedure for the experimental diagram are presented.

In Fig. 1, the deformation curve is shown. The test mode consists in maintaining a constant longitudinal strain rate of the rock specimen during loading, which is achieved when using a servo-controlled press operating in an automated mode of controlled longitudinal strains. Tests are carried out in uniaxial or triaxial compression with a strain-

rate range from 10^{-3} to 10^{-8} s^{-1}. From the specimen deformation curve (Fig. 1), the elastic modulus E and the post-peak modulus M, the total strain ε_{total}, and the elastic strain ε_e are determined.

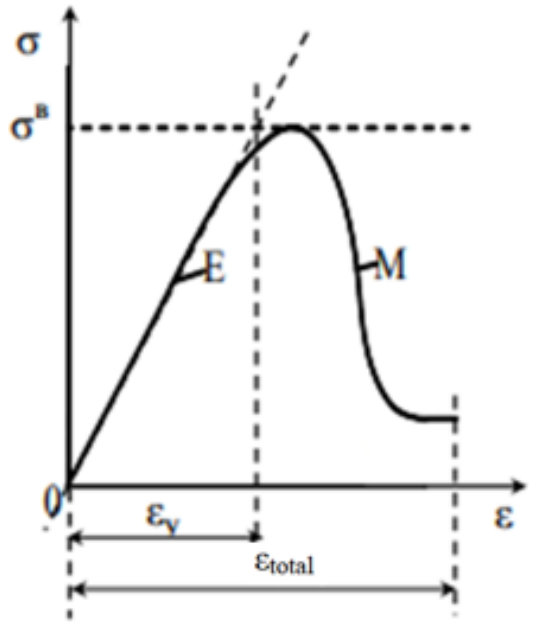


Fig.1 - Schematic "stress–strain" diagram under uniaxial compression: σ_1—axial stress on the specimen, MPa; ε_1 - longitudinal strain of the specimen; E - elastic modulus of the specimen, MPa; M-post-peak modulus of the specimen, MPa; σ_{res} - residual strength, MPa; σ_{uc} - uniaxial compressive strength, MPa

The figure is provided for the visual interpretation of the relationship discussed in the text.

To move from analysis of the diagram shape to quantitative classification, indicators are used that relate elastic properties to the character of post-peak softening. As calculation criteria, the ratio-of-moduli coefficient and the elastic-strain fraction coefficient are applied.

When assessing brittleness (rockburst hazard) of rocks, the following coefficients are considered:

$$K_1 = \frac{E}{M}$$

$$K_2 = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{total}}$$

For $K_1 < 1$ the rock is considered rockburst-prone; for $K_1 > 1$ it is considered non-rockburst-prone. For $K_2 > 0.7$ the rock is rockburst-prone; for $K_2 < 0.7$ the rock is considered non-rockburst-prone. If at least one coefficient confirms rockburst proneness, a conclusion is made that the rock is rockburst-prone.

Thus, criteria K_1 and K_2 provide a unified approach to interpreting test results and make it possible to compare rockburst proneness under different loading conditions. Below, the requirements for sample size and data processing are presented.

Rock mass deformability is one of the most sensitive parameters in stability problems. The rock mass deformation modulus largely determines the expected convergence of excavations, stress redistribution, and the tendency for the development of damaged zones around an opening. Direct estimation of the rock mass deformation modulus from in-situ tests is often constrained by cost and organizational conditions; therefore, empirical relationships are widely used in practice. A systematic discussion of such relationships and a formula proposed in the mid-2000s that accounts for the Geological Strength Index, intact rock modulus, and a disturbance factor have become one of the most cited bases for engineering estimates [9]. However, comparative studies show that different empirical methods can yield substantially different values of the rock mass deformation modulus even for identical initial rock mass characteristics. In a study based on dozens of rock mass scenarios, it is emphasized that the choice of correlation should be determined by the rock mass type and the expected deformation mechanism; otherwise, computational predictions may systematically overestimate or underestimate deformations [10]. This conclusion has a direct practical implication: it is advisable to estimate the rock mass deformation modulus by several methods and then verify consistency with in-situ observations and instrumental monitoring.

Determination of deformation properties of rocks is carried out in accordance with GOST 28985–91. The standard applies to hard rocks with uniaxial compressive strength not less than 5

MPa and establishes the method for determining their deformation characteristics. Longitudinal ε_1 and transverse ε_2 strains, axial load (P), and lateral pressure are recorded automatically by the measuring system and saved to an Excel file. The loading rate is 0.1 mm/min until specimen failure. Based on the measurements, "stress σ – strain ε" relationships are constructed (Fig.2). Stress is calculated from the expression:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2}$$

The deformation modulus Ed and the Poisson's ratio ν are determined in the selected stress range (σ_start – σ_end) of the linear portion of the loading branch using the formulas: expression:

$$E_d = \frac{\sigma_{\text{end}} - \sigma_{\text{start}}}{\varepsilon_{1\text{end}} - \varepsilon_{1\text{start}}}$$

$$\nu = \frac{\epsilon_{2\text{end}} - \epsilon_{2\text{start}}}{\epsilon_{1\text{end}} - \epsilon_{1\text{start}}}$$

where σ_{end}, σ_{start} are the stress values at the end and at the beginning of the loading range; $\varepsilon_{1\text{end}}$, $\varepsilon_{1\text{start}}$ are the relative longitudinal strains at the end and at the beginning of the range; $\varepsilon_{2\text{end}}$, $\varepsilon_{2\text{start}}$ are the relative transverse strains at the end and at the beginning of the range. In the case of a nonlinear "stress–strain" relationship, a linear approximation method is applied.

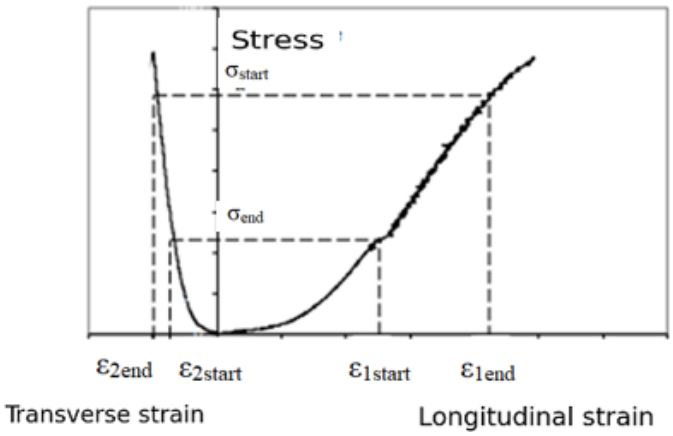


Fig.2 - "stress σ – strain ε" relationships for determining deformation properties of rocks

As depth and geological complexity increase, the role of natural stresses becomes decisive. Under such conditions, an engineering rock mass classification focused on fracturing and discontinuity quality does not provide sufficient information for predicting stress-controlled manifestations: slabbing, spalling, bursting, and dynamic failure. Therefore, in-situ methods for stress determination are applied in stressed areas. One of the most common is hydraulic fracturing, as well as hydraulic testing of pre-existing fractures. The methodological bases and limitations of these methods are described in detail in the recommended methods of the International Society for Rock Mechanics. It is emphasized that results are sensitive to borehole orientation, the presence and nature of natural fractures, borehole wall condition, and the correctness of interpreting breakdown and shut-in pressures. It is especially important that a reliable assessment requires a series of tests and comparison of results, because the rock mass is generally heterogeneous and single tests may reflect a local feature rather than the regional stress field [11]. The stress–strain relationships presented in Figures 1 and 2 correspond to generalized deformation behavior of rocks, including crack closure, elastic deformation, stable crack propagation and post-peak failure

stages, which are widely confirmed in recent studies [12,13]. Modern experimental and numerical studies also demonstrate that rock behavior under loading is nonlinear and includes distinct deformation stages reflected in stress–strain curves [14,15].

A separate layer of literature is devoted to the fact that the stress state and deformation mechanism of rock masses under complex natural–technogenic processes depend on the combined influence of geology and technogenic impact. Using karst sinkholes as an example, it is shown that deformation development is staged and requires an integrated approach in which in-situ observations are linked to a model representation of stress redistribution [16]. This result is important for underground mines as well: it confirms that stress-related manifestations rarely have a single cause, and correct interpretation requires systematic comparison of data.

For underground ore mining, methods oriented toward stope and excavation stability play an important role. A special place is occupied by the stability graph method, which relates a "modified stability number" of the rock mass to excavation geometry and allows prediction of the likelihood of collapse or the need for enhanced support. Contemporary publications emphasize that this method is widely used in underground polymetallic mines and is continuously refined as practical data accumulate [17]. Crucially, such methods are observational by nature: they work well when an operation can collect and classify actual stability data and correctly relate them to rock mass parameters. Therefore, in engineering practice it is rational to apply stability graphs in combination with rock mass classification, stress–strain modeling, and deformation monitoring. In that case, the empirical graph is not a "replacement" but part of a comprehensive toolkit.

Support of underground openings in mines has evolved from simple "load bearing" solutions to systems where not only static strength matters, but also deformation compatibility with the rock mass, the ability to hold blocks, accommodate movements, and under certain conditions resist dynamic impacts. Classical works on rock mechanics for underground operations emphasize that the support design must correspond to the failure mechanism and be part of the overall stability design concept [18]. A significant contribution to support practice was made by manuals on cable bolting, which describe design principles, installation technology, quality control, and observational adjustment based on instrumentation data. These works emphasize that support should be designed iteratively: the initial design is refined based on actual rock mass behavior and the characteristics of installed support [19].

For conditions prone to dynamic manifestations, the literature separately considers principles of designing support capable of withstanding dynamic loads and large displacements. It is shown that support selection under such conditions should be iterative and must include verification based on observational data, since static approaches do not reflect the real system behavior under dynamic failure [20]. In domestic studies devoted to assessing rock mass condition at large mines, it is also emphasized that classification assessments and observations should be combined with consideration of real manifestations and technological factors [11]. In works on integrated high-productivity extraction technologies, emphasis is placed on the fact that stability and safety must be considered as part of the technological mining scheme, and geomechanical support becomes a key factor in ensuring productivity [21].

The observational concept in geomechanics is that the design decision is treated as a hypothesis that is refined as data on rock mass behavior are obtained. Therefore, monitoring should not be limited to recording "consequences"; its task is early detection of deformation trends and localization of active zones. In this context, instrumental methods are important that make it possible to obtain information on the depth and position of shear zones. For underground conditions, it is essential that instrumental data become meaningful only when interpreted jointly with a stress–strain model and with

an understanding of rock mass structure. In other words, monitoring is the “language of feedback”, but the decision is formed based on reconciliation of: classification description, stress model, computed rock mass parameters, and actual measurements.

Time domain reflectometry is a method in which the reflection of an electromagnetic pulse in a cable line is used to determine the location of damage or local change corresponding to shear or deformation in the rock mass. The methodology and examples of its use to determine the depth of a shear zone are described in detail in the classic work on slope monitoring; the key part of the approach transfers well to the tasks of localizing deformations in geotechnical systems provided correct installation and interpretation of signals [22].

Summarizing the literature, a stable pattern can be identified: each individual approach solves only part of the problem. Empirical methods rank the rock mass well by quality and help select support type, but they reflect stress-controlled failure mechanisms less effectively. Rock mass parameterization through the Geological Strength Index and a rock mass failure criterion creates a bridge to computations but requires correct structural assessment and calibration. In-situ stress determination methods provide fundamentally important information but are sensitive to heterogeneity and require a series of tests. Monitoring and support testing provide feedback but need interpretation. Therefore, an integrated approach in which these elements are combined into a closed support procedure represents the most substantiated methodology for underground ore mines, especially under high stresses, variable rock mass structure, and increased productivity requirements [23-25].

Results and discussion. Generalization of in-situ observations and computational interpretations shows that the stability of underground excavations is most correctly described by a consistent set of characteristics including rock mass quality, stress state parameters, and confirmation of support effectiveness by in-situ data.

Empirical methods for assessing rock mass condition provide a reproducible engineering language for comparing sites and make it possible to identify zones where stability reduction is expected when excavation geometry or mining technology changes. Their strength lies in speed and applicability under limited initial data. However, for stressed and structurally heterogeneous rock masses, empirical indices should be treated as a preliminary assessment that requires confirmation by computational analysis and in-situ stress measurements.

In-situ determination of the stress state is especially important for areas where instability manifestations are stress-controlled or associated with stress redistribution due to mining. Studies of the stress state and deformation mechanisms of rock masses under complex conditions, including natural–technogenic sinkhole zones, show that deformation processes depend on the combination of geological heterogeneity and technogenic factors, and interpretation requires linking field data and modeling. In this context, in-situ stress determination methods should be applied in series, and design solutions should be checked against the range of admissible initial parameters, which is consistent with recommended methods and reduces the risk of errors caused by local rock mass variability.

Quantitative results and relationships obtained from processing in-situ data and empirical parameterization are presented below. An example of quantitative assessment of rock mass quality and the associated expected deformability for two ore bodies is then provided.

Parameterization of rock mass strength and deformability for computational analyses should be based on geologically justified indices and should account for scale effects. The use of a rock mass failure criterion and empirical estimates of the deformation modulus makes it possible to form design parameters consistent with the observed structural state. Comparative studies show that discrepancies between empirical deformability estimates can be significant; therefore, the correctness of the correlation choice should be confirmed by comparison with in-situ deformation

observations and excavation behavior.

In-situ verification of support and deformation monitoring closes the support cycle. Support testing makes it possible to assess actual load-bearing capacity and technological reproducibility, while monitoring records the transition from quasi-static behavior to the development of local deformation zones. Practice in applying domain reflectometry shows its effectiveness for identifying the position and depth of active shear zones, which increases the information content of geomechanical control and allows decisions to be made before hazardous deformations develop. As a result, the integrated approach enables a transition from reacting to consequences to risk management based on data and their consistent interpretation, which is particularly important for high-productivity underground mining technologies.

Table 1 - Rock mass quality indicators and deformability assessment

Site	Ore body	Rock Quality Designation (RQD), %	Geological Strength Index (GSI)	Rock Mass Rating (RMR)	Q-system index (Q)	Rock mass deformation modulus, GPa
Quartzite Hills	1	55.8	50	54	4.5	16.51
Quartzite Hills	4	35.1	44	49	3.3	14.89

To interpret rock mass behavior, it is important to consider mechanical properties of the main lithological varieties; summary values are provided below.

Table 2 - Averaged mechanical properties of the main lithological varieties

Lithology	Tensile strength, MPa	Uniaxial compressive strength, MPa	Hoek–Brown parameter mi	Intact rock deformation modulus, GPa	Young's modulus of specimen, GPa	Poisson's ratio
Tuffs	6.7	76.5	11	11.45	51.14	0.25
Sedimentary rocks	8.1	48.1	7	10.95	40.13	0.25
Metasomatites	11.1	45.6	7	9.00	89.2	0.25

Below are the results of a series of in-situ tests illustrating the variability of the first loading pressure under similar conditions.

Table 3 - In-situ stress testing: first loading pressure and distance

Interval	Distance, m	First loading pressure, MPa
1	10	29.9
1	9	23.3
2	10	24.2

2	9	23.7
3	8	29.1
3	7	16.5

The plot makes it possible to visually assess the scatter of first loading pressures and its relationship with the distance to the opening zone in the test series (Figure 3).

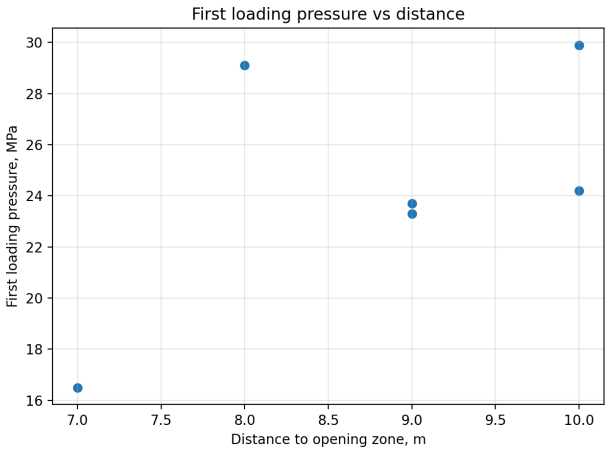


Fig.3 - First loading pressure and distance to the opening zone

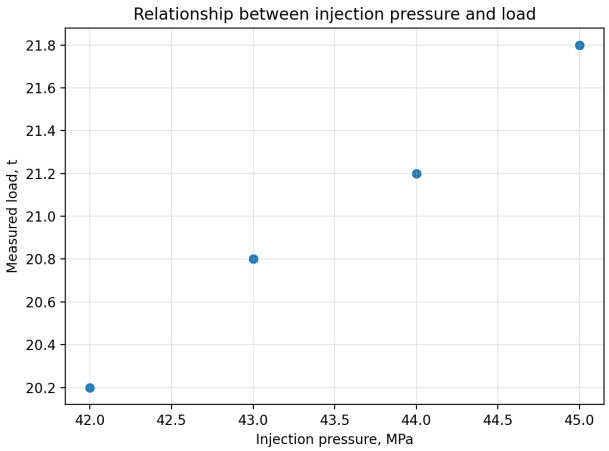


Fig.4 - Relationship between pressure and load in rock-bolt testing

To verify support reliability, the results of roof rock-bolt testing from several measurements are provided.

Table 4 - Rock-bolt tests

Location	Pressure, MPa	Load, t
Roof rock	42	20.2
Roof rock	45	21.8
Roof rock	43	20.8
Roof rock	44	21.2

The plot shows the relationship between injection pressure and measured load, which is used to check reproducibility of the test results.

Figure 4 is provided as a visual representation of the relationship used in interpretation and discussion of results.

The results obtained demonstrate that:

- discrepancies between empirical deformation modulus estimation methods can reach significant values, confirming the need for multi-method validation;

- integrated interpretation of in-situ stress measurements and monitoring data reduces uncertainty in geomechanical predictions;

- the application of the proposed integrated framework improves the reliability of support design decisions under complex geomechanical conditions.

Conclusions. The integrated approach that combines empirical rock mass assessment, selection of strength and deformation parameters for calculations, and in-situ stress determination and monitoring-based verification of decisions is a justified basis for geomechanical support of underground operations. Empirical methods are useful for ranking sites and for preliminary selection of excavation support. However, under high stress levels and rock mass heterogeneity, they should be supplemented by in-situ stress measurements and computational verification of the stability of the adopted decisions. Design parameters of the rock mass must be checked against actual observations: deformations and the real behavior of excavations. This is important because different empirical relationships can produce noticeably different deformability estimates for the same initial information. Deformation monitoring and in-situ verification of support performance should be a mandatory part of ground pressure management. They provide feedback and make it possible to adjust design and technological decisions in time. The proposed integrated approach can be considered as a methodological basis for modern geomechanical support systems, particularly under conditions of increasing mining depth and stress levels.

Литература

1. Макаров А.Б. Управление горным давлением при подземной разработке месторождений. Системы разработки/SRK, Москва. -2021. -73 с.

2. Абрамкин Н.И., Ефимов В.И., Мансуров П.А. Эмпирические методики оценки состояния массива горных пород// Известия УГГУ. -2021. -Т.4(64). -С. 109–115. DOI 10.21440/2307-2091-2021-4-109-115.

3. Deere D.U., Deere D.W. The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice/Rock Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM STP 984. -1988. ISBN 0-8031-0988-1.

4. Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering// New York: Wiley. -1989. ISBN: 9780471601722, 0471601721.

5. Grimstad E., Barton N. Updating of the Q-system for the Norwegian Method of Tunnelling// Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mech. -1993. -P.189-239.

6. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., et al. Hoek–Brown Failure Criterion - 2002 Edition // Proceedings of NARMS-TAC conference. -2002. -P.267–273.

7. Laubscher D.H. A Geomechanics Classification System for the Rating of Rock Mass in Mine Design// Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. -1990. -Vol.90(10). -P.257-273. DOI 10.10520/AJA0038223X_1954.

8. Marinos P., Hoek E. Geological Strength Index: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation// Proceedings of GeoEng 2000. -2000. -P.1422-1446.

9. Hoek E., Diederichs M.S. Empirical Estimation of Rock Mass Modulus // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. -2006. -Vol.43(2). -P.203-215. DOI 10.1016/j.ijrmms.2005.06.005.

10. Polemis Júnior K., Chagas da Silva Filho F., Pinheiro Lima-Filho F. Estimating the Rock Mass Deformation Modulus: A Comparative Study of Empirical Methods Based on 48 Rock Mass Scenarios// REM - International Engineering Journal. -2021. -Vol.74(1). -P.39-49. DOI 10.1590/0370-44672019740150.

11. Еременко В.А., Айнбиндер И.И., Пацкевич П.Г., Бабкин Е.А. Оценка состояния массива горных

пород на рудниках ЗФ ОАО ”ГМК ”Норильский никель” // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2017. -№1. -С.5-17. ISSN 0236–1493.

12. Feng X.T., Gong B., Liang Z., *et al*. tudy of the Dynamic Failure Characteristics of Anisotropic Shales Under Impact Brazilian Splitting // Rock Mechanics and Rock Engineering. -2024. -Vol.57. -P. 2213-2230. DOI 10.1007/s00603-023-03673-w.

13. Wen S., et al. Mechanical behavior of layered rocks under dynamic loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. -2023. -Vol.170:105533. DOI 10.1016/j.ijrmms.2023.105533.

14. Qiang Y., et al. Study on closing and cracking stress calculation method of fractured rock //Frontiers in Earth Science. -2023. -Vol. 10:839304. DOI 10.3389/feart.2022.839304.

15. Huang L., et al. Mathematical problems in rock mechanics and stress–strain evolution under thermal effects // Mathematics. -2023. -Vol.11(1):67. DOI 10.3390/math11010067.

16. Мамаев Ю.А., Власов А.Н., Мнушкин М.Г., Ястребов А.А. Изучение напряженного состояния и механизма деформирования массивов горных пород при образовании природно-техногенных карстовых провалов// Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. -2019. -Т.1. -Р.46-59. DOI 10.31857/S0869-78092019146-59.

17. Potvin Y. Empirical Open Stope Design in Canada//The University of British Columbia. - 1988. DOI 10.14288/1.0081130.

18. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock Mechanics for Underground Mining.3rd ed./ Dordrecht: Springer. -2006. DOI 10.1007/978-1-4020-2116-9.

19. Hutchinson D.J., Diederichs M.S. Cablebolting in Underground Mines/ BiTech Publishers. -1996. -406 p. ISBN 9780921095378.

20. Kaiser P.K., Cai M. Design of Rock Support System under Rockburst Condition// Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. -2012. -4(3). -P.215-227. DOI 10.3724/SP.J.1235.2012.00215.

21. Абрамкин Н.И., Дородний А.В., Бухарбаев И.У.Анализ интегрированной технологии высокопроизводительной отработки запасов выемочных участков угольных шахт//Уголь. -2019. -№1(1114). -С.40-45. DOI 10.18796/0041-5790-2019-1-40-45.

22. Kane W.F. Monitoring Slope Movement with Time Domain Reflectometry// Engineering, Environmental Science, Geology. -2000.

23. Sarr D., Sall O., Ndiaye M., Lompo N. Comparative Analysis of the Hard Hillsides Stability by Empirical Methods and Limit Equilibrium: Case of Ultra Basic and Andesites of Mako and Marbles of Bandafassi (Senegal)// Geomaterials. -2019. -Vol.9(3). -P.67-79. DOI 10.4236/gm.2019.93006.

24. Haimson B.C., Cornet F.H. ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation - Part 3: Hydraulic Fracturing (HF) and/or Hydraulic Testing of Pre-existing Fractures (HTPF)// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. -2003. -Vol.40(7-8). -P.1011-1020. DOI 10.1016/j.ijrmms.2003.08.002.

25. Kuranov A.D., Bagautdinov I.I. Experience of Geomechanical Research and Calculations toward Ore Deposit Development in Complex Mining Conditions// ISRM European Rock Mechanics Symposium - EUROCK 2018. -2018.

References

1. Makarov A.B. Upravlenie gornym davleniem pri podzemnoj razrabotke mestorozhdenij. Sistemy razrabotki/SRK, Moskva. -2021. -73 s. [in Russian]

2. Abramkin N.I., Efimov V.I., Mansurov P.A. Jempiricheskie metodiki ocenki sostojanija massiva gornyh

porod// Izvestija UGGU. -2021. -T. 4(64). -S.109-115. DOI 10.21440/2307–2091-2021-4-109-115. [in Russian]

3. Deere D.U., Deere D.W. The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice/Rock Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM STP 984. -1988. ISBN 0-8031-0988-1.

4. Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering// New York: Wiley. -1989. ISBN: 9780471601722, 0471601721.

5. Grimstad E., Barton N. Updating of the Q-system for the Norwegian Method of Tunnelling// Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mech. -1993. -P.189-239.

6. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., et al. Hoek–Brown Failure Criterion - 2002 Edition // Proceedings of NARMS-TAC conference. -2002. -P.267–273.

7. Laubscher D.H. A Geomechanics Classification System for the Rating of Rock Mass in Mine Design// Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. -1990. -Vol.90(10). -P.257-273. DOI 10.10520/AJA0038223X_1954.

8. Marinos P., Hoek E. Geological Strength Index: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation// Proceedings of GeoEng 2000. -2000. -P.1422-1446.

9. Hoek E., Diederichs M.S. Empirical Estimation of Rock Mass Modulus // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. -2006. -Vol.43(2). -P.203-215. DOI 10.1016/j.ijrmms.2005.06.005.

10. Polemis Júnior K., Chagas da Silva Filho F., Pinheiro Lima-Filho F. Estimating the Rock Mass Deformation Modulus: A Comparative Study of Empirical Methods Based on 48 Rock Mass Scenarios// REM - International Engineering Journal. -2021. -Vol.74(1). -P.39-49. DOI 10.1590/0370-44672019740150.

11. Eremenko V.A., Ajnbinder I.I., Packevich P.G., Babkin E.A. Ocenka sostojanija massiva gornyh porod na rudnikah ZF OAO ”GMK ”Noril’ skij nikel’” // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten’. -2017. -№1. -C.5-17. ISSN 0236-1493. [in Russian]

12. Feng X.T., Gong B., Liang Z., *et al*. tudy of the Dynamic Failure Characteristics of Anisotropic Shales Under Impact Brazilian Splitting // Rock Mechanics and Rock Engineering. -2024. -Vol.57. -P. 2213-2230. DOI 10.1007/s00603-023-03673-w.

13. Wen S., et al. Mechanical behavior of layered rocks under dynamic loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. -2023. -Vol.170:105533. DOI 10.1016/j.ijrmms.2023.105533.

14. Qiang Y., et al. Study on closing and cracking stress calculation method of fractured rock //Frontiers in Earth Science. -2023. -Vol. 10:839304. DOI 10.3389/feart.2022.839304.

15. Huang L., et al. Mathematical problems in rock mechanics and stress–strain evolution under thermal effects // Mathematics. -2023. -Vol.11(1):67. DOI 10.3390/math11010067.

16. Mamaev Ju.A., Vlasov A.N., Mnushkin M.G., Jastrebov A.A. Izuchenie naprjazhennogo sostojanija i mehanizma deformirovanija massivov gornyh porod pri obrazovanii prirodno-tehnogennyh karstovyh provalov// Geojekologija. Inzhenernaja geologija. Gidrogeologija. Geokriologija. -2019. -T.1. -P.46-59. DOI 10.31857/S0869-78092019146-59. [in Russian]

17. Potvin Y. Empirical Open Stope Design in Canada//The University of British Columbia. - 1988. DOI 10.14288/1.0081130.

18. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock Mechanics for Underground Mining.3rd ed./ Dordrecht: Springer. -2006. DOI 10.1007/978-1-4020-2116-9.

19. Hutchinson D.J., Diederichs M.S. Cablebolting in Underground Mines/ BiTech Publishers. -1996. -406 p. ISBN 9780921095378.

20. Kaiser P.K., Cai M. Design of Rock Support System under Rockburst Condition// Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. -2012. -4(3). -P.215-227. DOI 10.3724/SP.J.1235.2012.00215.

21. Abramkin N.I., Dorodnij A.V., Buharbaev I.U.Analiz integrirovannoj tehnologii vysokoproizvoditel' noj otrabotki zapasov vyemochnyh uchastkov ugol' nyh shaht//Ugol'. -2019. -№1(1114). -S.40-45. DOI 10.18796/0041-5790-2019-1-40-45. [in Russian]

22. Kane W.F. Monitoring Slope Movement with Time Domain Reflectometry// Engineering, Environmental Science, Geology. -2000.

23. Sarr D., Sall O., Ndiaye M., Lompo N. Comparative Analysis of the Hard Hillsides Stability by Empirical Methods and Limit Equilibrium: Case of Ultra Basic and Andesites of Mako and Marbles of Bandafassi (Senegal)// Geomaterials. -2019. -Vol.9(3). -P.67-79. DOI 10.4236/gm.2019.93006.

24. Haimson B.C., Cornet F.H. ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation - Part 3: Hydraulic Fracturing (HF) and/or Hydraulic Testing of Pre-existing Fractures (HTPF)// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. -2003. -Vol.40(7-8). -P.1011-1020. DOI 10.1016/j.ijrmms.2003.08.002.

25. Kuranov A.D., Bagautdinov I.I. Experience of Geomechanical Research and Calculations toward Ore Deposit Development in Complex Mining Conditions// ISRM European Rock Mechanics Symposium - EUROCK 2018. -2018.

Information about the authors

Shaposhnik S. N. - Scientific Supervisor, Limited Liability Partnership "EXPERT PRO", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: shaposhniksergey@mail.ru;

Shokarev D. A. - Advisor to the Director for Strategic Affairs, Limited Liability Partnership "EXPERT PRO", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: D.Shokarev@expertpro.kz

Matvienko N.V. - Head of R&D, Limited Liability Partnership "EXPERT PRO", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: n.matvienko@expertpro.kz;

Zikirova K. T. - Mineral Processing Engineer, Limited Liability Partnership "EXPERT PRO", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: k.zikirova@expertpro.kz;

Dauletzhanova Zh. T. - PhD Mining Engineering, Technology, Leading Researcher of LLP "Institute of Coal Chemistry and Technology", K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: kaliyeva_zhanna@mail.ru;

Konurin A. I. - Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS), Novosibirsk, Russia, e-mail: Konurin@misd.ru.

Сведения об авторах

Шапошник С. Н. - научный руководитель, ТОО «EXPERT PRO», Астана, Казахстан, e-mail: shaposhniksergey@mail.ru;

Шокарев Д. А. - советник директора по стратегическим вопросам, ТОО «EXPERT PRO», Астана, Казахстан, e-mail: D.Shokarev@expertpro.kz;

Матвиенко Н. В. - руководитель отдела НИОКР, ТОО «EXPERT PRO», Астана, Казахстан, e-mail: n.matvienko@expertpro.kz;

Зикирова К.Т. - инженер по обогащению полезных ископаемых, ТОО «EXPERT PRO», Астана, Казахстан, e-mail: k.zikirova@expertpro.kz;

Даулетжанова Ж.Т. - PhD, горное дело и технологии, ведущий научный сотрудник ТОО «Институт химии угля и технологии», Казахский университет технологии и бизнеса им/ К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: kaliyeva_zhanna@mail.ru;

Конурин А. И. - старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, Новосибирск, Россия, e-mail: Konurin@misd.ru.

МРНТИ 06.52.13 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1272**

ЦЕНТРАЛЬНАЯ АЗИЯ В ГЛОБАЛЬНОЙ КОНКУРЕНЦИИ ЗА РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛЫ: РИСКИ ЦЕПОЧЕК ПОСТАВОК И ПУТИ УКРЕПЛЕНИЯ ПОЗИЦИЙ

[1]Г.М. Аубакирова, [1]Ф.М. Исатаева✉, [2]С.К. Мажитова, [1]Л.И. Тогайбаева, [3]С.М. Оспанова, [4]А.Т. Дюсекеева

[1]Некоммерческое акционерное общество «Карагандинский технический университет Им. Абылкаса Сагинова», Казахстан,
[2]Карагандинский университет Казпотребсоюза, Караганда, Казахстан,
[3]ТОО «ONYX LS», Астана, Казахстан,
[4]Казахский университет технологии и бизнеса имени К. Кулажанова, Астана, Казахстан

✉ *Корреспондент-автор: isataeva.farida@gmail.com*

По мере ускорения глобального перехода к декарбонизации и цифровизации растёт спрос на критически важные энергетические переходные минералы. Прогнозируемый спрос на минералы и геоэкономическая фрагментация становятся катализатором конкурентной борьбы за сохранение ресурсов, привлекают новых игроков на инвестиционный рынок, меняют глобальные цепочки поставок. В статье обосновано, что странам Центральной Азии, обладающих значительными запасами критических минералов и расположенных на перекрестке стратегических транзитных маршрутов, отведено особое место в конкуренции крупнейших экономических держав вокруг отрасли редкоземельных металлов. PESTEL-анализ позволил выявить ключевые угрозы развития отрасли редкоземельных металлов, структурные ограничения и внутренние уязвимости Центральной Азии, оценить возможности центрально-азиатских стран для интеграции в высокотехнологичные сегменты цепочек создания стоимости как внутри региона, так и за его пределами. Исследованиями установлено, что для укрепления стратегической позиции Центральной Азии среди системно значимых экономик с позиции управления цепочками поставок критических минералов, необходимы структурные сдвиги в пользу технологически сложных секторов. Авторы предлагают комплексный подход к управлению цепочкой поставок минералов, включающий выстраивание сбалансированной многовекторной внешней политики, привлечение качественных инвестиций, региональную координацию и расширение внутрипроизводственных перерабатывающих мощностей.

Ключевые слова: критически важные минералы, редкоземельные металлы, глобальные цепочки создания стоимости, Центральная Азия, стратегия, перерабатывающие мощности.

ОРТАЛЫҚ АЗИЯ СИРЕК ЖЕР МЕТАЛДАРЫ ҮШІН ӘЛЕМДІК БӘСЕКЕСТЕ: ЖЕТКІЗУ ТІЗБЕГІНІҢ ТӘУЕКЕЛДЕРІ ЖӘНЕ ПОЗИЦИЯЛАРДЫ НЫҒАЙТУ

[1]Г.М. Әубәкірова, [1]Ф.М. Исабаева✉, [2]С.К. Мәжитова, [1]Л.И. Тоғайбаева [3]С.М. Оспанова, [4]А.Т. Дүйсекеева

[1]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан,
[2]Қазтұтынуодағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан,
[3]"ONYX LS" ЖШС, Астана, Қазақстан,
[4]К.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
e-mail: isataeva.farida@gmail.com

Әлемдік деңгейде декарбонизация мен цифрландыруға көшу жеделдеген сайын, энергетикалық маңызды өтпелі минералдарға сұраныс артып келеді. Пайдалы қазбаларға болжамды сұраныс және геоэкономикалық бөлшектену ресурстарды үнемдеу үшін бәсекелестікті күшейтіп, инвестициялық нарыққа жаңа ойыншыларды тартып, жаһандық жеткізу тізбегін қайта құруда. Бұл мақалада маңызды минералдардың айтарлықтай қорына ие және стратегиялық транзиттік жолдардың қиылысында орналасқан Орталық Азия елдері сирек кездесетін жер металдар өнеркәсібінің айналасындағы ірі экономикалар арасындағы бәсекелестікте ерекше орын алатыны айтылады. PESTEL талдауы сирек кездесетін жер металдар өнеркәсібінің дамуына төнетін негізгі қауіптерді, құрылымдық шектеулерді және Орталық Азиядағы ішкі осалдықтарды анықтады және Орталық Азия елдерінің аймақ

ішінде де, одан тыс жерлерде де құндылық тізбектерінің жоғары технологиялық сегменттеріне интеграциялану әлеуетін бағалады. Зерттеу Орталық Азияның маңызды минералдарды жеткізу тізбегін басқару тұрғысынан жүйелік маңызды экономикалар арасындағы стратегиялық орнын нығайту технологиялық тұрғыдан күрделі секторларға құрылымдық ауысуды қажет ететінін анықтады. Авторлар минералды жеткізу тізбегін басқаруға кешенді тәсілді ұсынады, оның ішінде теңгерімді, көпвекторлы сыртқы саясатты әзірлеу, жоғары сапалы инвестицияларды тарту, аймақтық үйлестіру және ішкі өңдеу қуатын кеңейту бар.

Түйін сөздер: маңызды минералдар, сирек жер металдары, жаһандық құн тізбегі, Орталық Азия, стратегия, қайта өңдеу қуаты.

CENTRAL ASIA IN GLOBAL COMPETITION FOR RARE-EARTH METALS: SUPPLY CHAIN RISKS AND WAYS TO STRENGTHEN POSITIONS

[1]G.M. Aubakirova, [1]F.M. Isataeva✉, [2]S.K. Mazhitova, [1]L.I. Togaybaeva, [3]S.M. Ospanova, [4]A.T. Dyusekeyeva

[1]Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
[2]Karaganda University of Kazpotrebsoyuz, Karaganda, Kazakhstan,
[3]"ONYX LS" LLP, Astana, Kazakhstan,
[4]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,
e-mail: isataeva.farida@gmail.com

As the global transition toward decarbonization and digitalization accelerates, demand for critical energy transition minerals is growing. Projected demand for minerals and geoeconomic fragmentation are catalyzing competition for resource conservation, attracting new players to the investment market, and reshaping global supply chains. This article argues that Central Asian countries, possessing significant reserves of critical minerals and located at the crossroads of strategic transit routes, hold a special place in the competition among major economies around the rare earth metals industry. A PESTEL analysis identified key threats to the development of the rare earth metals industry, structural constraints, and internal vulnerabilities in Central Asia, and assessed the potential of Central Asian countries to integrate into high-tech segments of value chains both within the region and beyond. The research found that strengthening Central Asia' s strategic position among systemically important economies in terms of managing critical minerals supply chains requires structural shifts toward technologically sophisticated sectors. The authors propose a comprehensive approach to mineral supply chain management, including developing a balanced, multi-vector foreign policy, attracting high-quality investment, regional coordination, and expanding in-house processing capacity.

Keywords: critical minerals, rare earth metals, global value chains, Central Asia, strategy, processing capacity.

Введение. В условиях растущего мирового спроса на критически важные энергетические переходные минералы (СЕТМ), в том числе на редкоземельные металлы (РЗМ), обеспечение устойчивых и конкурентоспособных по стоимости цепочек их поставок становится наиболее востребованной стратегической задачей [1].

Современный геополитический и геоэкономический ландшафт внес коррективы в глобальные цепочки создания стоимости (ГЦСС): наблюдается их реконфигурация, возрастают наукоемкость, степень локализации и регионализации поставок промежуточного продукта, усугубляется влияние глобальных санкций на страны-участники, меняется характер услуг, появляются бизнес-функции, от которых непосредственно зависят потребительская ценность товара и решение профильных задачи конкретного производства [2].

Для отслеживания вклада услуг и различных способов поставки в добавленную стоимость разных отраслей, вводятся новые показа-

тели торговли добавленной стоимостью (TiVA), позволяющие объективно оценить результативность и адаптивность динамичных цепочек поставок, в том числе горизонтально распределенных сетевых структур, отражающих вклад независимых участников ГЦСС в процесс создания стоимости конечного продукта [3].

В поиске ответов на вопросы касательно того, как и какой ценой будет расширяться предложение и регулирование доступности СЕТМ, определяющую роль играет государство. Именно оно выступает посредником и поставщиком ресурсов, содействует созданию актуальной инфраструктуры [4,5].

Для многих стран высококонцентрированные цепочки поставок обостряют геополитические конфликты, влияют на смежные перерабатывающие отрасли и энергетический баланс. Эти вызовы обуславливают необходимость реализации мер государственной политики, направленных на стимулирование эффективной интеграции стран в ГЦСС, повышение их экономического суверенитета.

Особенно решающая роль государственной поддержки глобальных цепочек поставок проявляется в развивающихся странах, которые стремятся сделать из ключевых минералов надежный стратегический актив, ускоряющий их экономический рост, расширяющий рамки сотрудничества, основанные на прозрачности, подотчетности и устойчивости.

Осознавая риски для национальной безопасности, связанные с подавляющем доминированием Китая, на долю которого приходится более 70% мировой добычи РЗМ, 90% их разделения и переработки, и вводимых им экспортных ограничений, мировые лидеры предпринимают шаги по увеличению внутреннего производства и диверсификации цепочек поставок.

Одновременно внимание мировых держав переключилось на один из самых быстрорастущих субрегионов в мире - Центральную Азию. Объясняется это не только обострением конкуренции за ключевые полезные ископаемые, но и перестройкой евразийской торговли, возобновлением интереса к альтернативным транспортным маршрутам, связывающим Восточную Азию, Европу и Ближний Восток, позиционированием Центральной Азии как целостного экономического пространства, способного привлекать качественные инвестиции.

Минеральный профиль которых сформирован геологическим картированием еще советского периода (рисунок 1).

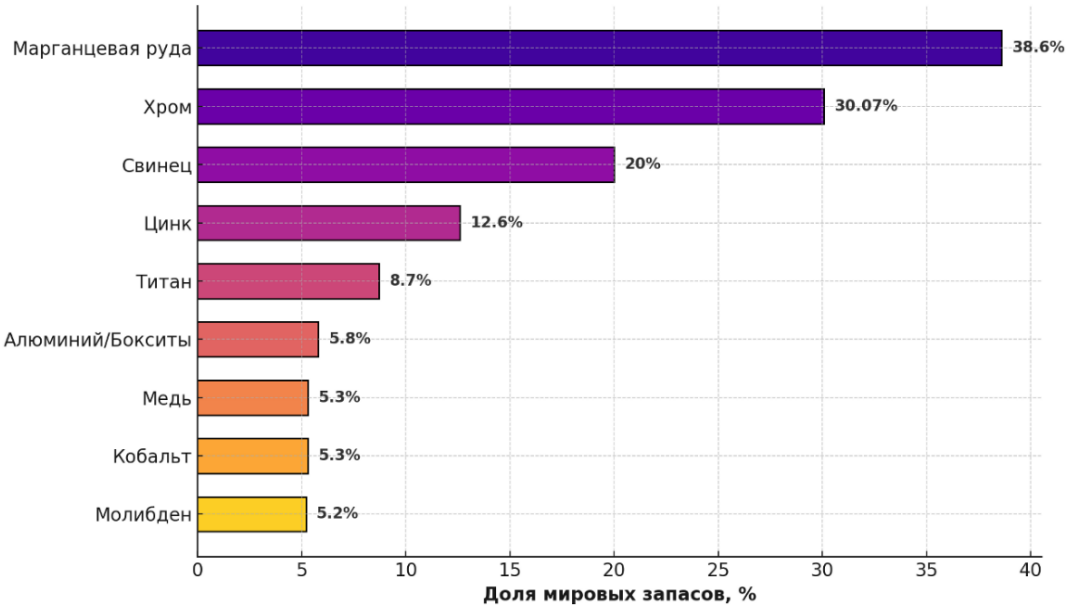


Рис.1 - Доля мировых запасов минеральных ресурсов стран Центральной Азии

Эти государства интегрированы в ГЦСС главным образом на этапе добычи и первичной обработки, обладают разнообразной минерально-сырьевой базой и существенным объемом мировых запасов (марганцевая руда- 38,6%, хром -30,07%, свинец -20%, цинк -12,6%, титан -8,7%, алюминий/бокситы -5,8%, медь -5,3%, кобальт -5,3%, молибден -5,2%) на этапе добычи и начальной обработки, рассматриваются преимущественно как поставщики первичного сырья с критически низкой долей технологической переработки [6].

Осознавая стратегическую ценность контроля цепочек поставок СЕТМ, эти страны стремятся освоить новые стратегии добычи, переработки, производства и конечного их использования, продвигать глубокую переработку ценнейшего сырья на своей территории, а не просто развивать модель «сырье в обмен на технологии» в сотрудничестве с развитыми экономиками. Благодаря возросшему спросу на РЗМ, страны Центральной Азии впервые могут превратить свою ресурсную зависимость в стратегический актив, перейти от роли пассивного поставщика сырья к субъекту международной политики.

Нарастающая конкуренция крупнейших держав за критические минералы, открывает для стран Центральной Азии возможность использовать геоэкономическое давление как рычаг для качественной промышленной модернизации национальных экономик, импорта высоких технологий и внедрения экологически ответственных методов добычи и стандартов ESG.

Таким образом, анализ трансформации ГЦСС в секторе критических минералов позволяет констатировать переход от модели свободной рыночной конкуренции к модели геоэкономической фрагментации. Установлено, что ключевым риском для устойчивости поставок является сверхвысокая концентрация перерабатывающих мощностей (более 90% по ряду РЗМ) в одной юрисдикции. Это создает объективные предпосылки для позиционирования Центральной Азии как альтернативного узла ГЦСС, способного обеспечить диверсификацию поставок в условиях глобального энергоперехода.

В свете сказанного целью исследования является оценка экономического потенциала индустрии критически важных минералов в странах Центральной Азии в контексте геостратегических перестроек цепочек их поставок, выявление ключевых рисков для мировых цепочек поставок РЗМ, разработка путей укрепления позиций этих стран в условиях многополярной конкуренции.

Объект исследования - страны Центральной Азии, обладающие огромными запасами критических минералов, рассматриваемые в контексте глобальных цепочек поставок.

Предмет исследования - геополитическая и геоэкономическая конкуренция ведущих стран мира, главным образом, США, ЕС и Китая, за доступ к РЗМ Центральной Азии, связанные с этим риски уязвимости цепочек поставок и возможности региона использовать глобальную конкуренцию для стимулирования внутристрановой добавленной стоимости.

Гипотеза строится на том, что интеграция Центральной Азии в ГЦСС обусловлена богатством и разнообразием минеральных ресурсов, но затруднена геополитической конкуренцией, неблагоприятными институциональными рамками, недостатком инвестиций и слабыми позициями в средней и конечной стадиях переработки.

Научная значимость. Исследование вносит вклад в осмысление нового геополитического фронта - конкуренции за критические минералы в эпоху энергетического перехода и деглобализации цепочек поставок. Исследование углубляет понимание того, как Центральная Азия будучи периферийным регионом, не имеющего выхода к морю, пытается совместить ресурсный национализм с устойчивым развитием и технологической модернизацией, повысить внутреннюю переработку и экспортную ценность минеральных ресурсов.

Предложенные в статье пути укрепления позиций региона имеют практическую ценность для государственной политики стран Центральной Азии, опыт которых окажется полезным развивающимся странам в их стремлении соответ-

ствовать инициативам энергетического перехода и реализации проактивного подхода к возобновляемым источникам энергии.

Материалы и методы. Исследование выполнено в рамках смешанных методов с преобладанием качественного анализа. Применены общие законы формализации, логики и сравнения, использован смешанный подход, сочетающий качественный и количественный анализ данных открытого доступа о горнорудном секторе стран Центральной Азии, для интеграции результатов применялся PESTEL - анализ.

Основные методы: сбор и критический анализ актуальных открытых данных по запасам, добыче, экспорту и переработке РЗМ с использованием национальных статистических комитетов стран ЦА за исследуемый период; оценка цепочек поставок с акцентом на ключевые узкие места (концентрация переработки в Китае, технологическая зависимость, экологические ограничения); сравнительный анализ стратегий центрально-азиатских стран касательно их продвижения в глобальных в цепочках поставок ключевых минералов, текущих инициатив и мировых соглашений, возможностей оптимизации цепочек поставок и внутрирегиональной переработки в обозримом будущем.

Авторы признают ограничения данного исследования - недостаточная транспарентность данных по запасам и переработке РЗМ в Центральной Азии, геополитическая ангажированность части источников, высокая волатильность геополитической обстановки, влияющая на инвестиционные решения. В открытых источниках конкретные количественные данные о ключевых РЗМ по изучаемым странам отсутствуют ввиду конфиденциального характера информации. По некоторым РМЗ дается только качественная оценка, многие доступные данные до сих пор носят фрагментированный характер. Такая ситуация объясняется как историческим прошлым Центральной Азии (наследие секретности), так и нарастающим геополитическими рисками, желанием некоторых внешних глобальных игроков не допускать утечки ценной информации.

Исходя из вышесказанного, во избежание проблем этического и юридического характера, методология исследования базируется на сочетании качественного и количественного анализа, дополненного более точными исходными данными, приведенными в открытых источниках. Применение указанного методологического подхода обусловлено тем, что сведения о ежегодном обновлении запасов поступают, во-первых, крайне редко, во-вторых, они чрезмерно зависимы от результатов разведки, что может отразиться на достоверности поступающих данных.

Несмотря на вышесказанное, авторы надеются, что с помощью данного исследования, имеющего аналитический и прикладной характер, будет инициирован дискурс по изучению стратегических ресурсов для стран с развивающейся экономикой, формирующих собственные бизнес-модели укрепления позиций в ГЦСС.

Результаты обсуждения. В условиях уменьшения географической протяженности ГЦСС и концентрации ключевых бизнес-функций в промышленно развитых странах, государства Центральной Азии пытаются найти баланс между экономической устойчивостью и открытостью, продвинуться вверх по цепочке создания стоимости, заложить основу для ГЦСС следующего поколения [7].

Чтобы занять позицию нового центра добычи полезных ископаемых, крупного мирового поставщика РЗМ и редкоземельных элементов (РЗЭ), этим странам необходимо осознать международную конкурентоспособность и глобальную рыночную стоимость отрасли РМЗ, оценить свой промышленный потенциал, смоделировать региональную интеграцию (таблица 1).

Анализ данных, представленных в таблице 1, свидетельствует о значительном и диверсифицированном минерально-сырьевом потенциале стран Центральной Азии в сфере РЗМ и критически важных минералов. Казахстан и Кыргызстан обладают наиболее крупными подтверждёнными запасами РЗЭ, Узбекистан и Туркменистан - существенными ресурсами лития и сопутствующих элементов, Таджикистан - перспективными проявлениями ниобия, тантала и сурьмы. Выявленные в 2024-2025 гг. новые

участки и упрощённые процедуры лицензирования указывают на активизацию геологоразведочных работ и рост инвестиционной привлекательности региона.

Таблица 1- Минерально-сырьевая база критических металлов и РЗМ стран Центральной Азии

Страна	Ключевые активы (месторождения)	Подтвержденные ресурсы / Типы РЗМ
Казахстан	Акбулак (РМЗ), Куйректыколь.	Запасы РЗЭ оцениваются в 2,6 млн. тонн. Подтвержденные запасы месторождения Жана Казахстан (порядка 935 тыс. тонн). Выявлено 38 новых перспективных участков в 2024 г. В 2025 г. выставлено на продажу 40 месторождений, выдано более 3,2 тыс. лицензий, внедряется упрощённая система лицензирования.
Узбекистан	Тебинбулак	Ресурсы лития (месторождение Нурликон 178,5 тыс. тонн). Значительные ресурсы вольфрама (потенциал 3-го места в мире по добыче). Ресурсы графита (Тасказган - никель-графитовое месторождение, свыше 1,3 млн тонн) [8,9]
Кыргызстан	Кутессай-II, Кызыл-Омполь	Иттрий, лантан, церий, титаномагнетит Ресурсы РЗМ (Кутессай-II, до 60 тыс. тонн). В 2024 г. снят мораторий на добычу урана и тория для стимуляции сопутствующей добычи РЗМ [10, 11]
Таджикистан	60 проявлений РЗМ в Раштской долине (ниобий и тантал), 15 новых место-рождений РМ, РЗЭ в районах Карасу, Агбасой, Пайрон, Рохшиф.	Высокая концентрация сурьмы и лития. Наличие проявлений ниобия и тантала. В 2024 г. зафиксирован рост лицензирования участков РЗМ [12,13]
Туркменистан	Кара-Богаз-Гол (литий), легкие РЗЭ (неодим, лантан) в Лебапском велаяте.	Литий (рапа), йод, бром [14]

Такое распределение ресурсной базы создаёт объективные предпосылки для формирования внутрирегиональной конфигурации цепочки создания стоимости, в которой добыча сырья сосредоточена преимущественно в Таджикистане, Кыргызстане и Казахстане, а стадии обогащения и первичной переработки - в Казахстане и Узбекистане, обладающих относительно развитой инфраструктурой и промышленными хабами. Данная конфигурация позволяет минимизировать зависимость от внешних поставок на ранних стадиях ГЦСС и повысить добавленную стоимость на последующих этапах (таблица 2).

В соответствии с методикой сравнительного анализа запасов РЗМ и РЗЭ в странах Центральной Азии, авторы приходят к выводу, что среди государств Центральной Азии по потенциалу РЗМ и РЗЭ наилучшие позиции занимают Казахстан и Узбекистан, лидирующие также в инновационном развитии: в 2021-2025 гг. Казахстан занимал в мировом рейтинге 77-83 места, в 2025 г. Узбекистан опередил Казахстан, поднявшись с 93 на 79 позицию, также в Узбекистане в 2025г. прогнозируется более высокий экономический рост (рисунок 2) [15].

Таблица 2 - Конфигурация внутрирегиональной цепочки создания стоимости

Этап ГЦСС	Роль стран-участниц	Ожидаемая добавленная стоимость
Добыча	Таджикистан, Кыргызстан, Казахстан	Минимальная (сырьевой экспорт)
Обогащение / Разделение	Казахстан, Узбекистан (хабы по добыче и переработке полезных ископаемых в Навоийской, Ташкентской и Сурхандарьинской областях)	+40-60% (концентраты, оксиды)
Производство компонентов	Региональная кооперация, инвесторы (ЕС, Корея)	+150-300% (магниты, сплавы)

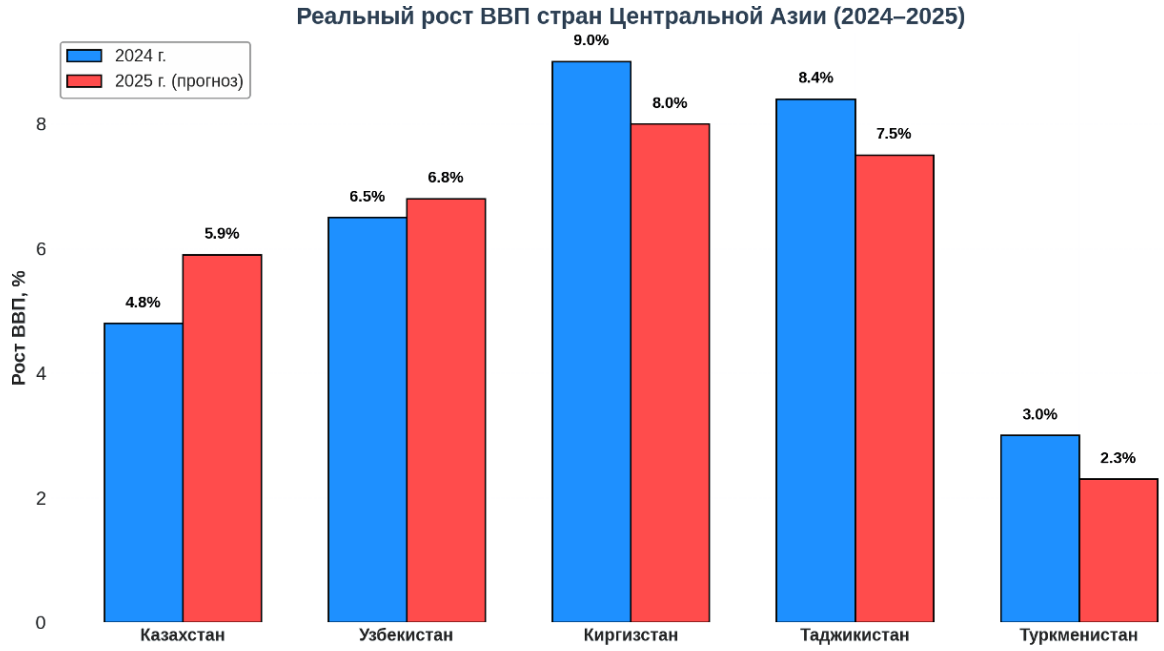


Рис.2 - Реальный рост ВВП стран Центральной Азии, %

Источник: International Monetary Fund.2025. World Economic Outlook:Global Economy in Flux, Prospects Remain Dim. Washington, DC. October

Новые разведанные месторождения закрепляют статус Казахстана, как источника критически важных материалов, в целом страну можно рассматривать как нетто-экспортера РЗМ (рисунок 3).

Несмотря на ориентацию инфраструктуры Казахстана в большей мере на цветные металлы, а не на переработку РЗМ, страна продвигается в создании перерабатывающих мощностей, освоении международных стандартов, укрепляя позиции крупного ресурсного хаба, регулирующего региональные цепочки добавленной стоимости.

Ограниченность официальной статистики по запасам не позволила полностью количественно оценить потенциал региона [16,17], однако сравнительный анализ ресурсной базы центральноазиатских стран и их нынешнего геополитического положения подтверждает гипотезу о затрудненной интеграции региона в ГЦСС из-за геополитической конкуренции, институцио-

нальных рамок и трудностями с переработкой РМЗ.

Незначительный вклад стран Центральной Азии в глобальные и региональные цепочки создания стоимости объясняется сложностями экономической диверсификации, высокими затратами на деловые транзакции и высокоскованной инвестиционной средой, значительно снижающей коммерческие способности. Низкий промышленный потенциал вынуждает полагаться на Россию или Китай, что усугубляет инфраструктурные и инвестиционные риски, что подтверждают результаты PESTEL-анализа, оказывающих влияние на формирование редкоземельной отрасли (таблица 3).

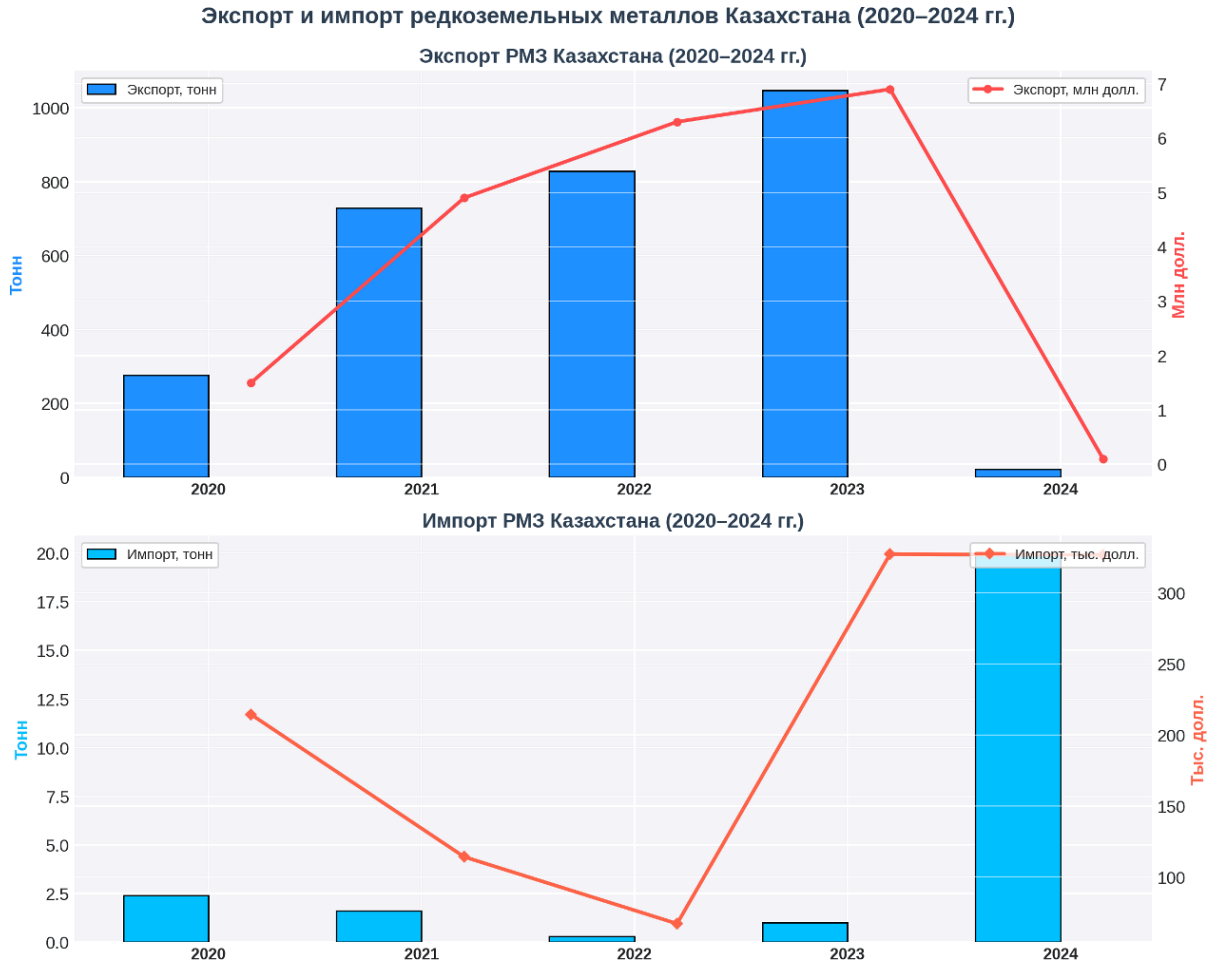


Рис.3 - Экспорт и импорт РМЗ Казахстана в 2020-2024 гг.

Источник: Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://stat.gov.kz

Результаты формализованного PESTEL-анализа позволили ранжировать факторы влияния на отрасль РМЗ в Центральной Азии (таблица 4). Установлено, что политические и экологические факторы оказывают критическое сдерживающее воздействие. Экологический фактор и стандарты ESG выделены как ключевое «окно возможностей»: внедрение экологически ответственной добычи является обязательным условием для включения региональных компаний в цепочки поставок системно значимых экономик (ЕС, США). Высокая зависимость от технологий КНР и РФ в вопросах разделения редкоземельных элементов блокирует выход региона на рынки высоких переделов.

Таблица 3 - PESTEL-анализ факторов, влияющих на отрасль РМЗ

P (политические) - рост конкуренции мировых держав за контроль над запасами РЗМ стимулирует интерес к Центральной Азии; - ограничения диверсификации из-за зависимости Центральной Азии от Китая и России; - расширение открытого доступа инвесторов к геологическим данным; - установление прозрачных контрактов на добычу РМЗ и лицензий на разведку полезных ископаемых с целью стимулирования предприятий участвовать в ГЦСС; - участие в ГЦСС с упором на переработку полезных ископаемых усиливает стратегические региональные позиции; - распространение на Центральную Азию конкуренции между Саудовской Аравией и ОАЭ за захват доли рынка переработки РМЗ; - создание странами Центральной Азии региональных альянсов.	**E (экономические)** - высокая потребность в РЗМ способствует инвестиционной активности, но низкая добавленная стоимость и волатильность цен ограничивают доходы; - рост зависимости от зарубежных инвестиций из -за отсутствия собственной инфраструктуры; - ограниченность местного предоставления промежуточных ресурсов и услуг вторым и третьим уровнями добавленной стоимости; - в среднесрочной и долгосрочной перспективе торговые потоки критически важных материалов не будут подвергаться геополитическому влиянию из-за масштабности их запасов, географической распространенности, возможности переработки во многих местах; - сложности получения компаниями доступа к ведущим мировым площадкам для привлечения капитала в горнодобывающую промышленность; - привлечение частных юниорских компаний, в том числе иностранных игроков, финансируемых мировыми горнодобывающими компаниями.
S (социальные) - несмотря на достигнутый уровень осведомленности и внедрение стандартов, при высоком спросе на критически важные минералы, их предложение неэластично, а добыча может стать катализатором отрицательных последствий и рисков для местных сообществ; - политический режим региона, отсутствие прозрачности в работе правительства, внутрирегиональные споры.	**T (технологические)** - отсутствие перерабатывающих мощностей, передовых технологий по разделению и переработки РЗМ, зависимость от китайских и российских технологий; - модернизации горнодобывающего сектора посредством развития местных технологических компетенций, цифровых технологий, экологически устойчивых практик; - развитие международного научно-исследовательского сотрудничества для содействия в передаче технологий переработки РМЗ, разработки новых карт в прогнозировании залежей стратегических ископаемых и их запасов; - **коллаборации с местными НИИ,** привлечение иностранных компаний к сотрудничеству через ГЧП.
E (Экологические) - возможность отслеживать минеральные продукты по всей цепочке создания стоимости вплоть до их происхождения; - освоение стандартов ESG (особенно гидро/солнечная энергия); - трудности предприятий в получении экологических разрешений на разведку в регионах присутствия; - риски загрязнения (особенно водных ресурсов Кыргызстана, Таджикистана).	**L (Правовые)** - совершенствование нормативно-правовой базы, раскрытие информации о производстве и торговли РМЗ для создания равных условий всем субъектам хозяйствования; - стремление сохранить конкурентное преимущество в экосистемах в сочетании с растущим спросом на социально- экологические устойчивые договоренности и практики.

Таблица 4 - Матрица стратегического анализа отрасли РМЗ (PESTEL-результаты)

Фактор	**Ключевое влияние на ГЦСС**	**Степень воздействия**

Политические	Рост протекционизма; конкуренция США,ЕС и КНР за доступ к месторождениям	Критическая
Экономические	Высокая капиталоемкость добычи и волатильность цен на РЗМ.	Высокая
Социальные	Требования местных сообществ к созданию рабочих мест и прозрачности доходов.	Средняя
Технологические	Дефицит технологий разделения тяжелых РЗЭ; зависимость от китайского софта	Высокая
Экологические	Необходимость сертификации ESG для экспорта на западные рынки	Критическая
Правовые	Несовершенство кодексов о недрах; отсутствие защиты интеллектуальной собственности	Средняя

В целом, заключаем, что роль центральноазиатских стран в диверсификацию ГЦСС будет определяться темпами консолидации перерабатывающих мощностей, финансированием коммерчески жизнеспособных маршрутов. Каждое государство играет свою роль в ГЦСС, предлагает свое видение экономической модернизации путем перехода к видам деятельности с более высокой ценностью, созданию наукоемкого и персонализированного продукта. Переход от поставок сырья к его глубокой переработке и выпуску продукции более высоких переделов приведет к увеличению национальной добавленной стоимости экспорта, что крайне важно для обеспечения долгосрочного коммерческого успеха перерабатывающих предприятий каждой из стран.

Несмотря на отсутствие технологий для глубокой переработки РЗЭ, инфраструктурные ограничения и геополитические разногласия, страны Центральной Азии расширяют возможности оптимизации цепочек поставок и внутрирегиональной переработки.

Для укрепления конкурентных позиций одной лишь диверсификации источников добычи редкоземельных руд недостаточно. Китайские предприятия по первичной переработке РЗМ остаются самыми экономически эффективными в мире благодаря крупномасштабным производствам, потребляющим большие объемы сырья и поддерживающим рентабельность, более низкой стоимости рабочей силы, меньшему количеству экологических и нормативных барьеров.

Исследование показало, что индивидуальные попытки стран Центральной Азии по созданию вертикально-интегрированных производств полного цикла (от руды до неодимовых магнитов) сталкиваются с проблемой нерентабельности из-за высоких капитальных затрат. Обоснована экономическая эффективность модели «региональной кооперации», предполагающей разделение стадий ГЦСС: концентрация первичной добычи в ресурсных узлах (Кыргызстан, Таджикистан) с последующим рафинированием на базе технологических хабов Казахстана и Узбекистана. Такая конфигурация позволяет достичь эффекта масштаба и снизить транзитные риски в рамках ТМТМ.

Сотрудничество государств Центральной Азии с ЕС, обладающим технологиями, компетенциями и инвестиционным потенциалом, расширит возможности как добывающей, так и перерабатывающей отраслей, будет способствовать развитию местной промышленности путем привлечения инвестиций в регион, росту социальной и экологической устойчивости, ускорит доступ государств Центральной Азии к инфраструктуре мирового класса, исследованиям и инновациям, стимулирующим промышленные инвестиции [18,19].

Для роста устойчивости центральноазиатских стран в перестраивающихся ГЦСС необходимо:

- укреплять внутренний бизнес-сектор и улучшать деловой климат, развивать независимую

оценку запасов как фундамент доверия инвесторов, совершенствовать управление ресурсами в соответствии с международными стандартами ОЭСР, EITI, ESG, TCFD, CRIRSCO/KAZRC, ICMM, IRMA как основы прозрачности и доверия на горнорудном рынке; создавать нормативно-правовые экосистемы, уменьшающие инвестиционные неопределенности разведки на ранних стадиях;

- углублять региональную интеграцию и трансграничные связи, сохраняя при этом открытость для глобальной торговли. Создавать в регионе надежные производственные сети и цепочки поставок и стимулировать внутрирегиональный спрос путем устранения трансграничных ограничений на перемещение товаров и услуг;

- инвестировать в человеческий капитал и инфраструктуру, ориентированную на высокотехнологичное производство; защищать права интеллектуальной собственности и коммерческие интересы; приоритетное внимание к НИОКР для развития инновационных технологий, повышающих эффективность процессов разделения и очистки РЗЭ;

- разработать стратегию, сочетающую прочные внутренние позиции (объединение разведки, переработки, экспорта и промышленной политики, особенно в части финансирования геологоразведки и создания специфической инфраструктуры для переработки РМЗ) с углубленной интеграцией и целенаправленным международным партнерством;

- развивать отраслевые кластеры, стратегические отраслевые центры по оказанию цифровых и бизнес-услуг.

Учитывая высокую стоимость и сложность рентабельной эксплуатации перерабатывающих предприятий, определяющее место в управлении цепочками поставок РЗМ, играет интеграция взаимодополняемости ресурсов. Это подход, основанный на координации стран с запасами РМЗ и потенциал их переработки, повысит устойчивость и инвестиционную привлекательность региона. Благодаря взаимодополняемости и созданию региональных хабов, страны Центральной Азии смогут поддерживать баланс между Китаем, который вместе с Индией становится основным фактором роста мировой экономики, и другими странами.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает гипотезу о том, что статус Центральной Азии как «пассивного поставщика сырья» может быть преодолен только через институциональные реформы и технологическую кооперацию. Основным результатом работы стала систематизация рисков цепочек поставок и обоснование перехода к проактивной политике управления ресурсами.

Укрепление стратегических позиций региона в глобальной конкуренции за РЗМ требует не наращивания объемов добычи, а формирования локальных технологических компетенций в средней части цепочки создания стоимости (midstream), что позволит увеличить национальную добавленную стоимость экспорта на прогнозируемые 15-20% в долгосрочной перспективе. Странам Центральной Азии предстоит преодолеть ряд ограничений, от которых зависят преобразование ресурсных активов в рыночные преимущества и укрепление позиции в мировом предложении СЕТМ [20,21].

Для реализации комплексного подхода, включающего многовекторную политику, создание региональных перерабатывающих хабов, партнерство с ЕС, США и Кореей, цифровизацию и внедрение стандартов ESG/EITI для привлечения инвестиций, региону предстоит преодолеть выявленные в данном исследовании риски (политическая зависимость от Китая и России, экономическая волатильность цен, технологическая отсталость, экологические угрозы и социальные конфликты).

Предложенные меры реализуемы в среднесрочной перспективе: уже к 2026 г. Казахстан может активизировать работы на 40 месторождениях, в Узбекистане к 2028 г. на планируемую мощность выведут 76 проектов, взаимовыгодные партнерства повысят добавленную стоимость экспорта на 20-30% и снизят зависимость от Китая.

Своим исследованием авторы привлекают внимание к тому, что странам Центральной Азии предстоит развивать свой потенциал в области горнодобывающих технологий, отраслей средней и высшей ступени переработки и разделения полезных ископаемых посредством стратегического сотрудничества на коммерческих условиях с зарубежными партнерами.

Будущие исследования могут быть улучшены за счет учета негативного влияния на коммерческую привлекательность центральноазиатских государств санкций по отношению к странам, окружающим Центральную Азию. На наш взгляд, в краткосрочной и среднесрочной перспективе санкции приведут к снижению экспортных возможностей, высоким транзитным расходам и высокорискованной инвестиционной среде.

Литература

1. IEA. Global Critical Minerals Outlook.- 2025.- 312 p. URL:https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025- Date of access:18.08 2025.

2. Le H. T. Global economic sanctions and export survival: evidence from cross-country data // Entrepreneurial Business and Economics Review.-2022.-Vol.10(1).-P.-22. DOI 10.15678/EBER.2022.100101.

3. Cai M. et al. Towards new Trade in Value-Added (TiVA) indicators that account for modes of supply in services trade: The TiVA-MoS database // OECD Trade Policy Papers. -2025.- 35 p. ISSN: 1816-6873.

4. Thakur-Weigold B., Miroudot S. Promoting resilience and preparedness in supply chains// OECD Trade Policy Papers.- 2024. - 48 p. DOI 10.1787/be692d01-en.

5. Transaction data for evidence-based industrial policy//OECD Science, Technology and Industry Policy Papers.- 2025.- 42 p. DOI 10.1787/46d7c123-en.

6. Vakulchuk R., Overland I. Central Asia is a missing link in analyses of critical materials for the global clean energy transition//One Earth.- 2021. - P.1678–1692.

7. Liu S. L. et al. Global rare earth elements projects: New developments and supply chains // *Ore* Geology Reviews. - 2023. - Vol.157: 105428. DOI 10.1016/j.oregeorev.2023.105428.

8. Энергетический переход в Узбекистане URL: https://www.sfa-oxford.com/lithox/critical-minerals-policy-legislation/all-countries/asia/uzbekistan/ - Дата обращения:19.09 2025

9. Uzbekistan plans to implement rare mineral projects worth $2.6 billion. URL: https://invexi.org/press/uzbekistan-plans-to-implement-rare-mineral-projects-worth-2-6-billion/.- Date of access:12.09.2025).

10. Распоряжение Кабинета Министров Кыргызской Республики от 20 марта 2024 года № 106-р Об утверждении Плана мероприятий по реализации Указа Президента Кыргызской Республики «О реализации Национального проекта по добыче полиметаллов и редкоземельных элементов для динамичного развития экономики Кыргызской Республики» от 22 января 2024 года № 5 (с изменениями и дополнениями по состоянию на 03.12.2024 г.). URL: https://cbd.minjust.gov.kg/57-19123/edition/22361/ru.-Дата обращения: 03.09.2025.

11. IEA. Global Critical Minerals Outlook.- 2024. URL:https://iea.blob.core.windows.net .- Date of access: 29.01.2026.

12. World Bank. Mining Sector Review 2024. Washington, DC: World Bank, 2024. – 45 p. URL: https://www.worldbank.org.- Date of access: 29.01.2026.

13. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: IEA, 2025. – 287 p. URL: https://www.iea.org .- Date of access: 29.01.2026.

14.6Wresearch. Turkmenistan Lithium Market (2025–2031): Industry & Analysis. New Delhi: 6Wresearch, 2025. URL: https://www.6wresearch.com.- Date of access: 29.01.2026.

15. Global Innovation Index 2025: Innovation at a Crossroads/WIPO.- 2025. URL: https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2025/assets/80937/global-innovation-index-2025.- Date of access: 13.09.2025.

16. Schwellnus C., Haramboure A., Samek L. Policies to strengthen the resilience of global value chains: Empirical evidence from the COVID-19 shock // OECD Science, Technology and Industry Policy Papers. -2023. - 43 p. DOI 10.1787/fd82abd4-en.

17. Kazakhstan's Resource Economy: Diversification Through Global Value Chains / Asian Development Bank and Islamic Development Bank. - 2024. - 120 p. DOI 10.22617/FLS240447.

18. Drost N., Cretti G., Van Giersbergen B. Central Asia emerging from the shadows: European Union-Central Asia relations in evolving Eurasian geopolitics // Clingendael. - 2025. - P.1-85. URL: https://www.clingendael.org/publication/central-asia-emerging-shadows-0.- Date of access: 13.09.2025.

19. Zakirov B. Role of Uzbekistan in the Rare Earth and Critical Minerals Economy. - 2025. DOI 10.70735/DEUF7298.

20. Туманшиев Д. А., Исова Л. Т., Жұмақанов Ә. Қазақстанның сирек кездесетін металдары: сыртқы экономикалық саясат // Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы. - 2025. - № 2(151). - б.54-67. DOI 10.32523/2616-6887-2025-151-2-54-67.

21. Saidova F. K., Ilhomov O. Rare Earth Elements and Global Power: The Economic Geography and Geopolitical Stakes of Strategic Resources // American Journal of Multidisciplinary Bulletin. - 2025. - Vol.3(4). - P.189-196. DOI 10.5281/zenodo.15311550.

References

1. IEA. Global Critical Minerals Outlook.- 2025.- 312 p. URL:https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025- Date of access:18.08 2025.

2. Le H. T. Global economic sanctions and export survival: evidence from cross-country data // Entrepreneurial Business and Economics Review.-2022.-Vol.10(1).-P.-22. DOI 10.15678/EBER.2022.100101.

3. Cai M. et al. Towards new Trade in Value-Added (TiVA) indicators that account for modes of supply in services trade: The TiVA-MoS database // OECD Trade Policy Papers. -2025.- 35 p. ISSN: 1816-6873.

4. Thakur-Weigold B., Miroudot S. Promoting resilience and preparedness in supply chains// OECD Trade Policy Papers.- 2024. - 48 p. DOI 10.1787/be692d01-en.

5. Transaction data for evidence-based industrial policy//OECD Science, Technology and Industry Policy Papers.- 2025.- 42 p. DOI 10.1787/46d7c123-en.

6. Vakulchuk R., Overland I. Central Asia is a missing link in analyses of critical materials for the global clean energy transition//One Earth.- 2021. - P.1678–1692.

7. Liu S. L. et al. Global rare earth elements projects: New developments and supply chains // *Ore* Geology Reviews. - 2023. - Vol.157: 105428. DOI 10.1016/j.oregeorev.2023.105428.

8. Jenergeticheskij perehod v Uzbekistane. URL: https://www.sfa-oxford.com/lithox/critical-minerals-policy-legislation/all-countries/asia/uzbekistan/ - Data obrashhenija:19.09 2025.[in Russian]

9. Uzbekistan plans to implement rare mineral projects worth $2.6 billion. URL: https://invexi.org/press/uzbekistan-plans-to-implement-rare-mineral-projects-worth-2-6-billion/.- Date of access:12.09.2025).

10. Rasporjazhenie Kabineta Ministrov Kyrgyzskoj Respubliki ot 20 marta 2024 goda № 106-r Ob utverzhdenii Plana meroprijatij po realizacii Ukaza Prezidenta Kyrgyzskoj Respubliki «O realizacii Nacional' nogo proekta po dobyche polimetallov i redkozemel' nyh jelementov dlja dinamichnogo razvitija jekonomiki Kyrgyzskoj Respubliki» ot 22 janvarja 2024 goda № 5 (s izmenenijami i dopolnenijami po sostojaniju na 03.12.2024 g.). URL: https://cbd.minjust.gov.kg/57-19123/edition/22361/ru.-Dataobrashhenija:03.09.2025 [in Russian]

11. IEA. Global Critical Minerals Outlook.- 2024. URL:https://iea.blob.core.windows.net.- Date of access: 29.01.2026.

12. World Bank. Mining Sector Review 2024. Washington, DC: World Bank, 2024. – 45 p. URL: https://www.worldbank.org.- Date of access: 29.01.2026.

13. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: IEA, 2025. – 287 p. URL: https://www.iea.org.- Date of access: 29.01.2026.

14.6Wresearch. Turkmenistan Lithium Market (2025–2031): Industry & Analysis. New Delhi: 6Wresearch, 2025. URL: https://www.6wresearch.com.- Date of access: 29.01.2026.

15. Global Innovation Index 2025: Innovation at a Crossroads/WIPO.- 2025. URL: https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2025/assets/80937/global-innovation-index-2025 .- Date of access: 13.09.2025.

16. Schwellnus C., Haramboure A., Samek L. Policies to strengthen the resilience of global value chains: Empirical evidence from the COVID-19 shock // OECD Science, Technology and Industry Policy Papers. -2023. - 43 p. DOI 10.1787/fd82abd4-en.

17. Kazakhstan's Resource Economy: Diversification Through Global Value Chains / Asian Development Bank and Islamic Development Bank. - 2024. - 120 p. DOI 10.22617/FLS240447.

18. Drost N., Cretti G., Van Giersbergen B. Central Asia emerging from the shadows: European Union-Central Asia relations in evolving Eurasian geopolitics // Clingendael. - 2025. - P.1-85. URL: https://www.clingendael.org/publication/central-asia-emerging-shadows-0.- Date of access: 13.09.2025.

19. Zakirov B. Role of Uzbekistan in the Rare Earth and Critical Minerals Economy. - 2025. DOI 10.70735/DEUF7298.

20. Tumanshiev D. A., Isova L. T., Zhұmaқanov Ә. Қazaқstannyң sirek kezdesetin metaldary: syrtқy jekonomikalyқ sajasat // L.N. Gumilev atyndaғy Eurazija ұlttyқ universitetinің Habarshysy. - 2025. - № 2(151). - b.54-67. DOI 10.32523/2616-6887-2025-151-2-54-67.[in Kazakh]

21. Saidova F. K., Ilhomov O. Rare Earth Elements and Global Power: The Economic Geography and Geopolitical Stakes of Strategic Resources // American Journal of Multidisciplinary Bulletin. - 2025. - Vol.3(4). - P.189-196. DOI 10.5281/zenodo.15311550.

Сведения об авторах

Аубакирова Г. М.- профессор, Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова», Караганда, Казахстан, e-mail: rendykar@gmail.com;

Исатаева Ф.М.- ассоциированный профессор, Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова»,Караганда, Казахстан, e-mail: isataeva.farida@gmail.com;

Мажитова С.К.- кандидат экономических наук, доцент, Карагандинский университет Казпотребсоюза,Караганда, Казахстан, e-mail: Skm19@mail.ru;

Тогайбаева Л.И.- кандидат экономических наук, Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова,Караганда, Казахстан, e-mail: toglusia@mail.ru;;

Оспанова С.М.- ведущий инженер ТОО "ONYX LS", Астана, Казахстан, e-mail: ospanovasan@gmail.com;

Дюсекеева А.Т.- доцент Казахский университет технологии и бизнеса имени К. Кулажанова, кафедры химии, химической технологии и экологии, Астана, Казахстан, e-mail: dyusekeeva_at@mail.ru.

Information about authors

Aubakirova G. M.- Professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: rendykar@gmail.com;

Isataeva F. M.- Associate Professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,

e-mail: isataeva.farida@gmail.com;

Mazhitova S. K.- Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Karaganda University of Kazpotrebsoyuz, , Karaganda, Kazakhstan, e-mail: Skm19@mail.ru;

Togaibaeva L. I.- Candidate of Economic Sciences, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: toglusia@mail.ru;

Ospanova S. M.- Lead Engineer, TOO ”ONYX LS”, Astana, Kazakhstan, e-mail: ospanovasan@gmail.com;

Dyusekeeva A. T.- Associate Professor K. Kulzhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: dyusekeeva_at@mail.ru.

IRSTI 82.17.252 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1361**

EXPLAINING THE GAP BETWEEN INTEREST AND APPLICATION INTENTION IN PUBLIC SECTOR EMPLOYMENT

[1]M. Yerbatyrov, [1]M. Zhetpisbayeva, [2]Zh. Vladimirov, [3]G. Baidauletova

[1]Karaganda university of Kazpotrebsoyuz, Karaganda, Kazakhstan,
[2]Sofia University «St. Kliment Ohridski», Sofia, Bulgaria,
[3]Shymkent University, Shymkent, Kazakhstan

Corresponding author: gulnur.baidauletova@mail.ru

Research on public sector attractiveness consistently reveals a gap between positive evaluations of public missions and the actual willingness of young people to apply for government positions. This article aims to explain this gap by analytically distinguishing two stages of career decision making: the formation of interest and the formation of application intention. The empirical basis of the study consists of survey data collected from students of Karaganda university of KAZPOTREBSOYUZ (N = 196) in September 2025, who evaluated a real vacancy in the public sector. The findings demonstrate that symbolic attractiveness associated with mission and perceived public value plays a significant role in generating interest, but loses explanatory power at the stage of intention formation. Application intention emerges under conditions of anticipated work constraints and early sectoral screening; whereby innovation-oriented students exclude the public sector from their set of considered alternatives. In addition, evaluative ambivalence is identified as a stable condition that disrupts linear transitions from values to action. The results refine the explanatory scope of public service motivation (PSM) theory and highlight the need to complement attraction models with mechanisms of early exclusion and ambivalent evaluation.

Keywords: public service motivation, public sector attractiveness, application intention, innovation orientation, ambivalence, early sectoral exclusion.

ОБЪЯСНЕНИЕ РАЗРЫВА МЕЖДУ ИНТЕРЕСОМ И НАМЕРЕНИЕМ ПОДАТЬ ЗАЯВКУ НА РАБОТУ В ГОСУДАРСТВЕННОМ СЕКТОРЕ

[1]М. Ербатыров, [1]М. Жетписбаева, [2]Ж. Владимиров, [3]Г.О. Байдаулетова

[1]Карагандинский университет «Казпотребсоюза», Караганда, Казахстан,
[2]Софийский университет «Св. Климент Охридского», София, Болгария,
[3]Шымкентский университет, Шымкент, Казахстан,
e-mail: gulnur.baidauletova@mail.ru

В исследованиях привлекательности государственной службы устойчиво фиксируется разрыв между положительной оценкой публичных миссий и реальной готовностью молодых специалистов подавать заявления на государственные должности. Цель настоящей статьи заключается в объяснении данного разрыва через разграничение двух стадий карьерного решения формирования интереса и формирования намерения действовать. Эмпирическую основу исследования составляют данные анкетного опроса студентов Карагандинского университета «КАЗПОТРЕБСОЮЗА» (N = 196), проведённого в сентябре 2025 года при оценке конкретной вакансии в государственном секторе. Показано, что символическая привлекательность, связанная с миссией и общественной значимостью государственной службы, оказывает существенное влияние на формирование интереса, однако утрачивает объяснительную силу при переходе к намерению подать заявление. Намерение формируется в условиях ожидаемых ограничений повседневной работы и предварительного отраслевого отбора, в рамках которого инновационно ориентированные студенты исключают государственный сектор из числа рассматриваемых альтернатив. Кроме того, установлено, что амбивалентность оценок представляет собой устойчивое состояние, нарушающее линейный переход от ценностных установок к действию. Полученные результаты уточняют границы применимости

теории мотивации государственного служения (PSM) и указывают на необходимость дополнения моделей привлекательности механизмами раннего исключения и анализа противоречивых оценок.

Ключевые слова: мотивация государственной службы, привлекательность государственной службы, намерение подать заявление, инновационная ориентация, амбивалентность, раннее исключение сектора.

МЕМЛЕКЕТТІК СЕКТОРДАҒЫ ЖҰМЫСҚА ҚЫЗЫҒУШЫЛЫҚ ПЕН ӨТІНІШ БЕРУ НИЕТІНІҢ АРАСЫНДАҒЫ АЛШАҚТЫҚТЫ ТҮСІНДІРУ

[1]М. Ербатыров, [1]М. Жетпісбаева, [2]Ж. Владимиров, [3]Г.О. Байдаулетова

[1]«Қазтұтынуодағы» Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан,
[2]Әулие Климент Охрид атындағы София университеті, София, Болгария,
[3]Шымкент университеті, Шымкент, Қазақстан
e-mail: gulnur.baidauletova@mail.ru

Мемлекеттік қызметтің тартымдылығын зерттейтін еңбектерде қоғамдық миссияларды оң бағалау мен нақты мемлекеттік лауазымдарға өтініш беру ниетінің арасындағы алшақтық тұрақты түрде байқалады. Осы мақаланың мақсаты аталған алшақтықты мансаптық шешім қабылдаудың екі кезеңін, яғни қызығушылықтың қалыптасуы мен нақты әрекетке ниеттің қалыптасуын ажырату арқылы түсіндіру. Зерттеудің эмпирикалық негізін 2025 жылғы қыркүйек айында «ҚАЗТҰТЫНУОДАҒЫ» Қарағанды университетінің студенттері арасында (N = 196) жүргізілген сауалнама деректері құрады, онда студенттер мемлекеттік сектордағы нақты бос жұмыс орнын бағалады. Зерттеу нәтижелері мемлекеттік қызметтің миссиясы мен қоғамдық маңыздылығына байланысты символдық тартымдылықтың қызығушылықтың қалыптасуына елеулі әсер ететінін, алайда өтініш беру ниетіне көшу кезеңінде оның түсіндірмелік әлеуеті әлсірейтінін көрсетеді. Ниет күнделікті еңбек қызметіне қатысты күтілетін шектеулер мен алдын ала салалық іріктеу жағдайында қалыптасады, бұл ретте инновацияға бағдарланған студенттер мемлекеттік секторды қарастырылатын нұсқалар қатарынан ерте кезеңде алып тастайды. Сонымен қатар бағалаулардың амбиваленттілігі құндылықтардан нақты әрекетке өтудің сызықтық логикасын бұзатын тұрақты күй ретінде айқындалды. Алынған нәтижелер мемлекеттік қызмет мотивациясы (PSM) теориясының қолданылу шектерін нақтылап, тартымдылық модельдерін ерте алып тастау механизмдерімен толықтыру қажеттігін көрсетеді.

Түйін сөздер: мемлекеттік қызмет мотивациясы, мемлекеттік қызметтің тартымдылығы, өтініш беру ниеті, инновацияға бағдарлану, амбиваленттілік, саланы ерте алып тастау.

Introduction. Public sector attraction research has become unusually consistent in documenting one empirical pattern: early career candidates often endorse public missions, yet frequently hesitate to apply for public sector jobs. This pattern has been observed across countries, cohorts, and institutional settings, and it persists even where public sector work is evaluated positively in terms of social contribution and legitimacy [1 - 3]. Rather than disappearing with improved measurement or changing labor market conditions, the gap between positive evaluation and application intention has become one of the field's most stable findings [4].

Dominant explanations of this gap are rooted in public service motivation (PSM) and related attraction frameworks. These approaches assume that symbolic alignment with public values such as commitment to societal contribution, collective goals, or institutional purpose enters the decision process early and exerts a downstream influence on behavioral intention [5]. In our setting, weak application rates are typically interpreted as the result of incomplete information, competing incentives, or external constraints that interfere with otherwise positive motivations. Implicitly, intention is modeled as the behavioral endpoint of symbolic appeal [6].

However, accumulating empirical evidence challenges this assumption. Multiple studies report that once expectations about day-to-day work realities autonomy, flexibility, pace of decision making, and opportunities for initiative are taken into account, symbolic appeal no longer predicts application behavior in a reliable or consistent way [5]. Importantly, this pattern does not suggest that symbolic motivations are irrelevant. Instead, it indicates that their influence may be confined to earlier stages of evaluation and may not extend to the point at which individuals decide whether to apply.

This paper argues that the persistence of the attraction intention gap is not merely an empirical anomaly but a conceptual problem [7]. Specifically, prevailing attraction models' mis specify the decision process by treating application intention as a continuation of symbolic interest. Intention is not formed in the same evaluative environment as interest [8]. While interest reflects a broad assessment of meaning and desirability, intention emerges under anticipated constraints, sector level screening, and uncertainty about everyday work experiences. Under these conditions, symbolic evaluations do not operate as direct behavioral drivers [8].

Two overlooked mechanisms are central to this mi's specification. The first is early exclusion based on innovation related expectations. For many students, preferences for flexibility, autonomy, and dynamic work environments function as a preliminary filter that determines whether the public sector enters the considered set at all. When such expectations are salient, symbolic appeal does not compete with other job attributes; it becomes behaviorally irrelevant because the sector has already been screened out. In this study, innovation orientation operates not as a tradeoff variable but as a sector level exclusion logic.

The second mechanism is evaluative ambivalence. In practice than holding coherent and internally consistent views, students frequently evaluate public sector work in mixed terms simultaneously appreciating its societal value while doubting its capacity to offer engaging or autonomous work. This ambivalence is not a transient state or a measurement artifact. It represents a stable evaluative condition under which linear value to action models lose predictive power. When positive and negative judgments coexist, symbolic appeal may generate interest without resolving hesitation, leaving intention underdetermined.

Building on these arguments, this study reconceptualizes early career attraction to public sector employment by analytically separating interest from intention. Using survey data from students evaluating a real public sector vacancy, the analysis examines how symbolic appeal, innovation-oriented expectations, and ambivalence jointly shape different stages of the decision process. The findings demonstrate that while PSM and symbolic evaluations remain powerful predictors of interest, they are conceptually insufficient for explaining why individuals decide to apply. By locating the breakdown between evaluation and action, the paper refocuses public sector attraction theory on the conditions under which valued public service becomes actionable [9].

Materials and Methods. The study uses a cross sectional survey design to examine how symbolic appeal, innovation-oriented expectations, and evaluative ambivalence shape distinct stages of early career decision making: interest and application intention. Instead, then treating attraction as a single latent construct, the design explicitly separates evaluative appreciation from behavioral readiness, consistent with the paper's theoretical argument.

To reduce hypothetical bias, respondents evaluated a real public sector vacancy (Deputy head of a state institution, apparatus of the Akimat of the Karagandy region). Anchoring evaluations in a concrete job description ensures that responses reflect anticipated work realities, not abstract sectoral images. The context is analytically relevant because public sector employment in this setting is institutionally salient and widely associated with organizational constraints, allowing early exclusion mechanisms and ambivalence to surface clearly.

Data were collected between 17 and 24

September 2025 at Karaganda university of «KAZPOTREBSOYUZ». A targeted non probability sampling strategy was employed [6]. While this approach does not permit population level prevalence estimates, it is appropriate for theory driven research focused on identifying decision mechanisms instead than estimating population parameters [7].

The sample is predominantly female (74%), with most respondents in their third or fourth year of study. A majority reported no formal work experience, while approximately two thirds had completed an internship in a public organization. Gender and internship experience are included as controls in all models due to their documented associations with job interest and application behavior. An a priori power analysis indicated that the final sample provides sufficient power to detect medium sized effects in both linear and logistic regression models.

All variables were measured using 7-point Likert scales.

Interest and intention were measured with items capturing perceived job attractiveness, willingness to accept an offer, initiative to apply, and readiness to relocate if required.

Symbolic appeal was measured using items capturing mission alignment, perceived societal contribution, and meaningfulness of public service.

Innovation orientation captured preferences for flexibility, autonomy, and a dynamic work pace.

Ambivalence was operationalized using a cross valence index combining positive and negative evaluations of public sector work; reliability was assessed using the Spearman-Brown coefficient.

The analysis proceeded in three steps aligned with the paper's theoretical claims. First, descriptive analyses assessed overall evaluation patterns and divergence between interest and intention. Second, linear regression models examined predictors of interest, testing whether symbolic appeal remains dominant once innovation expectations and ambivalence are included. Third, logistic regression models examined application intention, treating intention as a behavioral decision in practice than a continuous preference.

Predictor variables were mean centered prior to analysis, and interaction terms were computed as multiplicative products. Intention was dichotomized for logistic regression (0 = unlikely or neutral; 1 = likely).

Participation was voluntary, informed consent was obtained, and responses were anonymous. All procedures complied with institutional ethical standards.

Results and Discussion. Table 1 summarizes the characteristics of the sample (N = 196). The sample is predominantly female (74%), with most respondents in their third or fourth year of study (92%). Slightly more than half of the respondents (54%) receive a state scholarship. A substantial majority report no formal work experience (75%), while 67% have completed an internship in a public institution.

Table 1 - Sample characteristics (N = 196)

Variable	Categories	%
Gender	Female (145), Male (51)	74 / 26
Year of study	1st (7), 2nd (8), 3rd (98), 4th (83)	4 / 4 / 50 / 42
State scholarship	Yes (106), No (90)	54 / 46
Work experience	Yes (49), No (147)	25 / 75
Internship in public institutions	Yes (131), No (65)	67 / 33
Note: Authors' calculations based on survey data		

This composition reflects a typical early career student population evaluating first full-time employment opportunities. Gender and internship experience are therefore included as control variables in all subsequent model specifications.

Table 2 reports descriptive statistics for the three indicators of job interest. Overall evaluations are moderately positive: mean values range from 4.3 to 5.0 on the 7-point scale. Organizational attractiveness (M = 4,9) and willingness to accept an offer (M = 5,0) show relatively high central tendency, with approximately 60% of respondents selecting values of 5 or higher.

Table 2 - Descriptive statistics for interest indicators

Indicator	Mean	% ≥5	% Max	% Min
Attractiveness	4,9	62	29	9
Accept offer	5,0	60	42	9
Apply independently	4,3	49	28	25
Note: Authors' calculations based on survey data				

In contrast, initiative to apply independently exhibits a markedly different distribution. Although its mean remains above the scale midpoint (M = 4.3), responses are strongly polarized, with 28% selecting the maximum category and 25% selecting the minimum category.

This divergence indicates that positive evaluations of the vacancy do not translate uniformly into readiness to act, providing early descriptive evidence for a separation between general interest and application intention.

Gender differences are pronounced. Among respondents fully willing to apply (score = 7), 93% are women (51 of 55), whereas among respondents fully unwilling to apply (score = 1), 71% are men (35 of 49). Other background characteristics show no systematic association with interest indicators. Year of study, scholarship status, and prior work experience do not meaningfully differentiate evaluations. Internship experience in public institutions is descriptively associated with higher interest but does not exhibit sufficient variation to support robust statistical inference and is therefore treated as a control variable in subsequent models.

Table 3 presents Spearman correlations between value orientations and indicators of job interest. Two consistent patterns emerge. Orientations toward social mission, stability, and structured work are positively associated with all interest indicators, with correlations ranging from ρ ≈ 0,32 to 0,52. In contrast, innovation orientation is negatively associated with each indicator, with correlations ranging from ρ ≈ –0,27 to -0,55.

Table 3 - Spearman correlations (ρ) between values and interest indicators

Orientation	Attr.	Accept	Apply	Relocate	Consider
Mission	0,46	0,52	0,38	0,38	0,50
Stability	0,48	0,38	0,38	0,31	0,51
Structure	0,42	0,32	0,37	0,13	0,36
Innovation	–0,55	–0,47	–0,41	–0,27	–0,53
Note: Authors' calculations based on survey data					

Notably, innovation orientation exhibits the strongest associations in absolute terms, particularly with organizational attractiveness and willingness to accept an offer. This pattern indicates that preferences for autonomy and dynamic work environments are systematically related to lower evaluations of the public sector vacancy at the interest stage.

Overall, the correlation structure shows a clear alignment between value orientations and early evaluative judgments, while remaining agnostic about whether these associations extend to application intention a question addressed in subsequent multivariate analyses.

Table 4 reports the results of an exploratory factor analysis conducted on the 18 attitude items. Sampling adequacy was high (KMO = 0,82), exceeding commonly accepted thresholds for factorability. Three factors with eigenvalues greater than one were extracted, jointly explaining 68% of the total variance.

Table 4 - Exploratory factor analysis of attitudinal items (N = 196)

Item	General Evaluation	Mission Prestige	Material Organizational Conditions
Organizational attractiveness	0,81	-	-
Willingness to accept an offer	0,78	-	-
Initiative to apply	0,72	-	-
Recommend the job to others	0,69	-	-
Societal contribution	-	0,82	-
Public value	-	0,79	-
Trustworthiness of organization	-	0,74	-
Organizational prestige	-	0,71	-
Salary attractiveness	-	-	0,76
Job stability	-	-	0,73
Working conditions	-	-	0,68
Note: Authors' calculations based on survey data			

The first factor, general evaluation, captures overall positive assessment of the vacancy, including items related to organizational attractiveness, willingness to accept an offer, willingness to apply, and recommending the job. The second factor, mission and prestige, reflects symbolic evaluations such as societal contribution, public value, trustworthiness, and perceived prestige. The third factor, material and organizational conditions, captures evaluations of salary, stability, and working conditions. Factor loadings ranged from 0,61 to 0,82 across all factors.

Although application related items load together with general evaluative items at the measurement level, subsequent analyses treat interest and application intention as analytically distinct outcomes, consistent with the theoretical argument that intention is formed under different decision conditions than general evaluation.

Factor scores for mission and prestige and for material and organizational conditions were used as predictors in subsequent regression analyses.

Table 5 presents results from a multiple linear regression predicting overall interest in the

public sector vacancy. The dependent variable is an interest index, computed as the mean of organizational attractiveness, willingness to accept an offer, and initiative to apply.

Table 5 - Multiple linear regression predicting overall interest

Predictor	Std. β	SE	P value
Mission prestige	0,43	0,06	0,001
Material organizational conditions	0,25	0,07	0,01
Gender (female = 1)	0,19	0,08	0,05
Internship experience	0,07	0,06	n.s.
Note: Authors' calculations based on survey data			

Mission and prestige emerge as the strongest predictor of interest ($\beta \approx 0{,}43$, $p < 0{,}001$). Material and organizational conditions also contribute positively, though more moderately ($\beta \approx 0{,}25$, $p < 0{,}01$). Gender remains significant net of evaluative controls ($\beta \approx 0{,}19$, $p < 0{,}05$), while internship experience does not add explanatory power once subjective evaluations are included. The model explains approximately 45% of the variance in interest ($R^2 \approx 0{,}45$).

These results indicate that symbolic evaluations dominate the formation of interest, whereas background characteristics play a secondary role once perceptions of the job are taken into account.

Table 6 reports results from a logistic regression model estimating the probability of intending to apply for the vacancy. The dependent variable is binary and coded as 1 if the respondent reports an intention to apply (score ≥ 5) and 0 otherwise, consistent with prior research treating application intention as a threshold decision in practice than a continuous preference.

Table 6 - Logistic regression estimates of application intention (N = 196)

Predictor	Odds Ratio	SE	P value
Mission Prestige	1.45	0.18	.01
Stability orientation	1.32	0.16	.05
Innovation orientation	0.68	0.14	.01
Gender (female = 1)	1.60	0.25	.01
Internship experience	1.18	0.20	n.s.
Note: Authors' calculations based on survey data			

The results reveal a clear and asymmetric pattern. Higher evaluations of mission and Prestige are associated with an increased probability of applying, indicating that symbolic appeal continues to matter at the threshold of action. Stability orientation also contributes positively to application likelihood. In contrast, innovation orientation is associated with a lower probability of applying, consistent with an early exclusion mechanism. Gender differences persist net of evaluative controls, with women showing a significantly higher probability of intending to apply. Internship experience in public institutions has a positive but comparatively weaker association with application

intention.

Overall, the logistic regression results indicate that while symbolic and stability related evaluations increase the likelihood of applying, innovation-oriented expectations systematically reduce it. This pattern mirrors the descriptive distributions and reinforces the distinction between general interest and application intention.

This study set out to explain a persistent paradox in public sector attraction research: why positive evaluations of public missions so often fail to translate into application intentions. The results provide a clear answer. The gap between interest and intention is not a matter of weak motivation, missing incentives, or insufficient information. It reflects a misalignment between how attraction has been theorized and how early career decisions are actually formed.

The findings confirm a robust and well documented pattern: symbolic appeal mission, societal contribution, and perceived public value strongly predicts interest in public sector work. Students who value public service express higher attractiveness ratings and greater openness toward public sector employment. In this study, the empirical foundations of PSM theory remain intact.

At the intention stage, however, symbolic appeal does not carry over to the intention stage once anticipated work constraints are taken into account. When expectations about autonomy, flexibility, and everyday work dynamics enter the decision process, symbolic evaluations lose their predictive relevance for application behavior. Symbolic motivations continue to matter, though their effect appears limited to early evaluative stages. In practice, it demonstrates that their influence is structurally confined to the formation of interest. Treating intention as a behavioral extension of symbolic alignment therefore overstates the scope of PSM and obscures where the decision process actually breaks down.

A central contribution of this study lies in identifying innovation orientation as an early exclusion mechanism. Students who associate themselves with dynamic, flexible, and innovation driven work environments are significantly less likely to consider public sector employment, not because they reject its mission, but because they screen out the sector before symbolic considerations can become behaviorally relevant.

For many respondents, especially those with strong innovation preferences, this pattern challenges attraction models based on attribute tradeoffs. In the present case, innovation orientation does not compete with symbolic appeal; it precedes it. Once the public sector is excluded from the considered set, symbolic appeal no longer functions as a motivational input. This exclusion logic helps explain why public sector recruitment efforts that emphasize mission and societal impact often fail to reach innovation-oriented candidates, even when these candidates express strong prosocial values.

The results also demonstrate that ambivalence is a defining feature of how students evaluate public sector work. Instead, then expressing coherent or one-sided attitudes, many respondents simultaneously acknowledge the societal value of public service and doubt its capacity to offer engaging or autonomous work experiences. This ambivalence is not a transient hesitation or a measurement artifact. It represents a stable evaluative state in which positive and negative judgments coexist.

Under conditions of ambivalence, linear value to action models lose explanatory power. Symbolic appeal can increase interest without resolving hesitation, leaving intention underdetermined. From this perspective, the attraction intention gap is not surprising; it is a predictable outcome of decision making under evaluative conflict. Models that assume evaluative coherence therefore misinterpret ambivalence as noise, when it is in fact a core feature of the decision environment.

Taken together, these findings imply that public sector attraction theory needs to be reformulated around a stage sensitive view of decision making. Interest and intention are not successive points on a single continuum but outcomes of distinct evaluative processes. Symbolic appeal shapes interest by providing meaning and legitimacy. Innovation orientation determines whether the

public sector is considered at all. Ambivalence characterizes the context in which intention is formed and explains why interest frequently fails to convert into action.

From this perspective, the limitations of PSM theory are conceptual rather than empirical [5]. PSM explains why individuals like public sector work, but it cannot, on its own, explain why they decide to apply [8]. Addressing this limitation requires moving beyond linear attraction models and theorizing intention as a decision formed under anticipated constraint and unresolved evaluative conflict.

For research, these findings call for a clearer analytical separation between interest and intention in studies of public sector attraction. Treating intention as a distinct decision outcome opens new avenues for theorizing exclusion mechanisms, ambivalence, and sector level screening processes that are obscured in conventional models.

For practice, the results suggest that recruitment strategies focused exclusively on mission and symbolic appeal are unlikely to convert interest into applications among early career candidates. Addressing anticipated work constraints particularly perceptions of autonomy and innovation may be necessary not to increase symbolic appeal, but to prevent early exclusion from the considered set.

Overall, the study shows that the public sector attracts through meaning but loses candidates through anticipated constraint. Understanding this dynamic requires rethinking attraction not as a linear motivational process, but as a sequence of evaluative filters that shape whether valued public service becomes actionable.

Conclusion. This paper addressed a persistent paradox in public sector attraction research: students endorse public missions and report high symbolic appreciation, yet often do not intend to apply for public sector jobs. The findings show that this paradox is not a puzzle of weak motivation or inadequate incentives. It is a predictable outcome of a mis specified decision model one that treats application intention as the behavioral continuation of symbolic appeal.

Three conclusions follow.

First, symbolic appeal is a reliable mechanism of interest formation, not of intention. PSM and mission related evaluations continue to explain why early career candidates like public sector work. Yet once anticipated work constraints enter the decision especially expectations about autonomy, flexibility, and the dynamics of daily work symbolic evaluations no longer determine whether candidates intend to apply. The theoretical implication is not that PSM «fails», but that its explanatory scope is stage bound: it accounts for attraction as meaning, not for intention as action.

Second, innovation orientation operates as a sector level exclusion logic. For a substantial segment of students, preferences for dynamic and flexible work environments function as an early screening criterion that removes the public sector from the considered set before symbolic considerations can become behaviorally relevant. This mechanism helps explain why mission focused recruitment frequently produces interest without conversion: the candidates most sensitive to autonomy and innovation are filtered out prior to attribute tradeoffs.

Third, ambivalence is not noise but a stable evaluative state that reshapes how intention is formed. Students often hold mixed judgments valuing the societal contribution of public service while doubting its capacity to deliver engaging and autonomous work. Under such conditions, linear value to action models break down: symbolic appeal may raise interest, but it does not resolve hesitation, leaving intention underdetermined [9].

Taken together, these conclusions require a reformulation of public sector attraction theory. Interest and intention should not be treated as successive points on a single continuum but as outcomes of distinct evaluative processes [10]. Attraction begins with symbolic meaning, but application intention is formed under anticipated constraint, early sectoral screening, and persistent ambivalence. Models that continue to treat intention as downstream symbolic attraction will

systematically overestimate the behavioral reach of PSM.

For public employers, the practical implication is straightforward: mission-based messaging can generate interest, but it cannot by itself produce applications when candidates anticipate constrained autonomy and limited opportunities for initiative. Recruitment strategies that aim to convert early career interest into action must address the work dynamics expectations that trigger early exclusion and sustain ambivalence.

Ultimately, this study changes what the field should treat as the core explanatory problem. The question is not only who values public service, but when valuing public service becomes actionable and when, by design of the decision process, it does not.

References

1. Gupta R., Kakkar S., Chaudhuri M., Malik P., Saha S. Motivated to serve, conflicted to commit? Reassessing career satisfaction and publicness in the public service motivation–commitment nexus. //Asia Pacific Journal of Public Administration. -2026. DOI 10.1080/23276665.2026.2618128.

2. Perry J. L., Hondeghem A., Wise L. R. Revisiting the motivational bases of public service: Twenty years of research and an agenda for the future. //Administration review. -2010.-Vol.70(5). -P.681-690. DOI 10.1111/j.1540-6210.2010.02196.x.

3. Vandenabeele W., Breaugh J. It takes two to tango: concepts and evidence of further integration of public service motivation theory and self-determination theory//International Public Management Journal. - 2025. -Vol.28(1). - P.133-152. DOI 10.1080/10967494.2024.2386292.

4. Doverspike D., Flores C., VanderLeest J. Charter 14- Lifespan perspectives on personnel selection and recruitment. //Work across the lifespan.-2019.-P.343-368 DOI 10.1016/B978-0-12-812756-8.00014-1.

5. Vandenabeele W., Ritz A., Neumann O. Public service motivation: State of the art and conceptual cleanup. //The Palgrave handbook of public administration and management in Europe. -2017. -P.261-278. DOI 10.1057/978-1-137-55269-3_13.

6. Belle N., Cantarelli, P. Monetary incentives, motivation, and job effort in the public sector: An experimental study with Italian government executives. //Review of Public Personnel Administration. -2015. Vol.35(2). - P.99-123. DOI 10.1177/0734371X13520460.

7. Cash P. J. (2018). Developing theory-driven design research//Design Studies. - 2018.-Vol.56.-P.84 -119. DOI 10.1016/j.destud.2018.03.002.

8. Schott C., Neumann O., Bärtschi M., Ritz A. Public service motivation, prosocial motivation, prosocial behavior, and altruism: Towards disentanglement and conceptual clarity. //International jurnal of Public Administration. -2019.- P.1200 - 1211. DOI 10.1080.01900692.2019.1588302.

9.Nina Vari van Loon, W. Vandenabeele, P. Leisink. Clarifying the relationship between public service motivation and in-role and extra-role behaviors: The relative contributions of person-job and person-organization fit. //The American Review of Public Administration. -2017. Vol.47(6). -P.699-713. DOI 10.1177/0275074015617547.

10. Eslami, Z., & Taheri, Y. S. Exploring the relationship between public service motivation, prosocial motivation, and civil servants' organizational citizenship Behaviour: findings from a systematic literature review. -URL. https://www.rechtswissenschaft.unibe.ch.- Date of access: 20.12.2025.

Information about the authors

Yerbatyrov M.- PhD student, Karaganda university of Kazpotrebsoyuz, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: yerbatyr.meirambek@gmail.com;

Zhetpisbayeva M.- Candidate of Economic Sciences, Professor, Karaganda university of Kazpotrebsoyuz, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: rimakeu@mail.ru;

Vladimirov Zh.- Doctor of Economic Sciences, Professor, University of Sofia St Kliment Ohridski, Sofia, Bulgaria, e-mail: jeve@feb-uni.sofia.bg;

Baidauletova G.- Master, senior lecturer, Shymkent University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: super_khan@mail.ru.

Сведения об авторах

Ербатыров М.- PhD докторант, Карагандинский университет Казпотребсоюза, Караганда, Казахстан, e-mail: yerbatyr.meirambek@gmail.com;

Жетписбаева М.- кандидат экономических наук, профессор, Карагандинский университет Казпотребсоюза, Караганда, Казахстан, e-mail: rimakeu@mail.ru;

Владимиров Ж.- доктор экономических наук, профессор, Софийский университет ”Св. Климент Охридского”, София, Болгария, e-mail: jeve@feb-uni.sofia.bg;

Байдаулетова Г.- Магистр, старший преподаватель, Шымкентский университет, Шымкент, Казахстан, e-mail: super_khan@mail.ru.

МРНТИ 68.75.13 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1364**

СИСТЕМНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

[1]А.М. Шильманова✉, [1]Г.А. Ибраева, [1]А.С. Шайнуров, [2]Г.К. Иляшова, [3]С.А. Юсупова, [1]С.Ғ. Тұңғышбай

[1]Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан,
[2]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
[3]Казахская национальная академия хореографии, Астана, Казахстан

✉ *Корреспондент-автор: altynajsilmanova1@gmail.com*

В условиях нарастающей глобальной нестабильности и усиления внешних и внутренних рисков продовольственная безопасность все в большей степени приобретает системный характер и требует переосмысления традиционных подходов к ее анализу и обеспечению. Современные агропродовольственные системы функционируют в условиях высокой неопределенности, что актуализирует необходимость рассмотрения продовольственной безопасности не только через показатели производства и доступности продовольствия, но и через характеристики устойчивости, согласованности и воспроизводимости взаимодействий между ключевыми звеньями системы.

Целью исследования является выявление и анализ системных факторов формирования продовольственной безопасности агропродовольственной системы, а также определение их роли в обеспечении устойчивости продовольственного обеспечения в условиях внешних и внутренних шоков. Методологическую основу исследования составляют системный, институциональный и сравнительный подходы, позволяющие рассматривать продовольственную безопасность как результат функционирования агропродовольственной системы в целом. Информационной базой послужили материалы международных организаций, научные публикации и официальные статистические данные, включая источники ФАО, ОЭСР и национальные аналитические материалы.

В результате исследования показано, что в Республике Казахстан модель обеспечения продовольственной безопасности в значительной степени опирается на финансово-инструментальные меры государственной поддержки, ориентированные на отдельных хозяйствующих субъектов. При этом механизмы координации, кооперации и устойчивой интеграции участников агропродовольственных цепочек развиты в ограниченной степени и не выполняют системообразующей функции. Сделан вывод о том, что устойчивость продовольственного обеспечения в долгосрочной перспективе определяется не столько масштабами бюджетной поддержки, сколько качеством институциональной среды и воспроизводимостью взаимодействий между звеньями агропродовольственной системы.

Ключевые слова: продовольственная безопасность, агропродовольственная система, системные факторы, институциональная среда, устойчивость, Республика Казахстан.

АГРОӨНЕРКӘСІП ЖҮЙЕСІ ҚАУІПСІЗДІГІН ҚАЛЫПТАСТРУДАҒЫ ЖҮЙЕЛІК ФАКТОРЛАРЫ

[1]А.М. Шілманова✉, [1]Г.А. Ибраева, [1]А.С. Шайнуров, [2]Г.К. Иляшова, [3]С.А. Юсупова, [1]С.Ғ. Тұңғышбай

[1]Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Казақстан,
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Казақстан,
[3]Қазақ ұлттық хореография академиясы, Астана, Казақстан,
e-mail: altynajsilmanova1@gmail.com

Жаһандық тұрақсыздықтың күшеюі және сыртқы әрі ішкі қатерлердің артуы жағдайында азықтүлік қауіпсіздігі барған сайын жүйелік сипатқа ие болып, оны талдаудың және қамтамасыз етудің

дәстүрлі тәсілдерін қайта қарауды талап етеді. Қазіргі агроазық-түлік жүйелері жоғары белгісіздік жағдайында жұмыс істейді, бұл азық-түлік қауіпсіздігін тек өндіріс көлемі мен азық-түліктің қолжетімділігі көрсеткіштері арқылы ғана емес, сонымен қатар жүйенің орнықтылығы, келісімділігі және негізгі буындар арасындағы өзара әрекеттесулердің қайта өндірілу қабілеті тұрғысынан қарастырудың маңыздылығын арттырады.

Зерттеудің мақсаты агроазық-түлік жүйесінің азық-түлік қауіпсіздігін қалыптастыратын жүйелік факторларды айқындау және олардың сыртқы және ішкі күйзелістер жағдайында азық-түлікпен қамтамасыз етудің орнықтылығын қамтамасыз етудегі рөлін талдау болып табылады. Зерттеудің әдіснамалық негізін азық-түлік қауіпсіздігін агроазық-түлік жүйесінің тұтастай қызмет етуінің нәтижесі ретінде қарастыруға мүмкіндік беретін жүйелік, институционалдық және салыстырмалы талдау тәсілдері құрайды. Ақпараттық база ретінде ФАО, ЭЫДҰ материалдары, ғылыми жарияланымдар және ресми статистикалық деректер пайдаланылды.

Зерттеу нәтижесінде Қазақстан Республикасында азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету моделі негізінен жекелеген шаруашылық субъектілерін қолдауға бағытталған қаржылық-инструменталдық шараларға сүйенетіні анықталды. Бұл ретте агроазық-түлік тізбектерінің қатысушыларын үйлестіру, кооперациялау және орнықты интеграциялау тетіктері жеткілікті деңгейде дамымаған және жүйе құраушы функция атқармайды. Ұзақ мерзімді перспективада азық-түлікпен қамтамасыз етудің орнықтылығы бюджеттік қолдау көлемінен гөрі институционалдық ортаның сапасына және агроазық-түлік жүйесі буындары арасындағы өзара әрекеттесулердің қайта өндірілуіне тәуелді екендігі жөнінде қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: азық-түлік қауіпсіздігі, агроазық-түлік жүйесі, жүйелік факторлар, институционалдық орта, орнықтылық, Қазақстан Республикасы.

SYSTEMIC FACTORS IN THE FORMATION OF FOOD SECURITY WITHIN THE AGRI-FOOD SYSTEM

[1]A.M. Shilmanova✉, [1]G.A. Ibraeva, [1]A.S. Shainurov, [2]G.K. Ilyashova, [3]S.A. Yusupova, [1]S.G. Tungyshbai

[1]Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan,
[2]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
[3]Kazakh National Academy of Choreography, Astana, Kazakhstan,
e-mail: altynajsilmanova1@gmail.com

In the context of increasing global instability and the growing impact of external and internal shocks, food security is increasingly acquiring a systemic nature and requires a reconsideration of traditional analytical approaches. Contemporary agri-food systems operate under conditions of high uncertainty, which makes it insufficient to assess food security solely through indicators of agricultural production and food availability. Greater attention must be paid to the sustainability, coordination, and reproducibility of interactions between the key components of the agri-food system.

The purpose of this study is to identify and analyze the systemic factors shaping food security in the agri-food system and to determine their role in ensuring the sustainability of food provision under conditions of external and internal shocks. The methodological framework of the study is based on a combination of systemic, institutional, and comparative approaches, which allow food security to be examined as an outcome of the functioning of the agri-food system as a whole. The information base includes materials from international organizations, scientific publications, and official statistical data, including sources from FAO, OECD, and national analytical reports.

The results of the study show that in the Republic of Kazakhstan the food security model largely relies on financial and instrumental measures of state support aimed at individual economic entities. At the same time, mechanisms of coordination, cooperation, and sustainable integration of participants in agri-food value chains remain insufficiently developed and do not perform a system-forming function. It is

concluded that in the long term the sustainability of food security depends less on the scale of budgetary support and more on the quality of the institutional environment and the reproducibility of interactions within the agri-food system.

Keywords: food security, agri-food system, systemic factors, institutional environment, sustainability, Republic of Kazakhstan.

Введение. В условиях усиливающейся глобальной нестабильности вопросы продовольственной безопасности приобретают выраженный системный характер и выходят за рамки традиционного анализа, основанного исключительно на объемах сельскохозяйственного производства и уровне самообеспеченности. Нарушения логистических цепочек, рост цен на продовольственные ресурсы, климатические и технологические риски, а также высокая волатильность мировых рынков усиливают уязвимость национальных агропродовольственных систем и актуализируют необходимость пересмотра подходов к формированию продовольственной безопасности.

Современные международные исследования подчеркивают, что продовольственная безопасность определяется не только физической доступностью продовольствия, но и характером функционирования агропродовольственной системы в целом, включая процессы переработки, распределения, рыночного взаимодействия и координации участников. В этом контексте она рассматривается как результат действия совокупности взаимосвязанных факторов, формирующих устойчивость, адаптивность и воспроизводимость агропродовольственных цепочек в условиях внешних и внутренних воздействий.

Для стран с протяженной территорией, высокой региональной дифференциацией и значительной долей малых и средних производителей данная проблематика приобретает особую значимость. Агропродовольственная система Республики Казахстан характеризуется сочетанием достаточной сырьевой базы и одновременно повышенной чувствительности к экономическим, логистическим и институциональным шокам, что во многом обусловлено фрагментарностью связей между производственными, перерабатывающими и распределительными звеньями.

Несмотря на наличие значительного массива научных исследований, посвященных продовольственной безопасности, в литературе сохраняется недостаточная разработанность системного подхода к анализу факторов ее формирования. Большинство работ сосредоточено либо на макроэкономических показателях и объемах производства, либо на отдельных сегментах продовольственного рынка, тогда как комплексное рассмотрение институциональных, организационных и координационных факторов остается фрагментарным.

Целью настоящего исследования является выявление и анализ системных факторов формирования продовольственной безопасности агропродовольственной системы, а также определение их роли в обеспечении устойчивости системы в условиях внешних и внутренних вызовов.

Гипотеза исследования заключается в том, что уровень продовольственной безопасности определяется не только масштабами сельскохозяйственного производства, но и характером действия системных факторов, связанных с организацией, координацией и устойчивостью функционирования агропродовольственной системы в целом.

Научная новизна исследования заключается в интерпретации продовольственной безопасности не как результата действия отдельных инструментов аграрной политики или объемов сельскохозяйственного производства, а как следствия функционирования агропродовольственной системы в целом, определяемого совокупностью системных факторов. В работе обосновано, что ключевую роль в формировании устойчивости продовольственного обеспечения играют институциональная архитектура, степень согласованности и воспроизводимости взаимодействий между производственными, перерабаты-

вающими и сбытовыми звеньями, а также наличие встроенных механизмов адаптации к внешним и внутренним шокам. В отличие от преобладающих в научной литературе подходов, ориентированных преимущественно на показатели доступности и самообеспеченности, в исследовании предложен системный анализ продовольственной безопасности, позволяющий выявить ограниченность финансово-инструментальной модели поддержки и обосновать необходимость смещения акцентов государственной аграрной политики в сторону развития устойчивых механизмов координации и интеграции участников агропродовольственных цепочек.

Таким образом, в существующих исследованиях недостаточно раскрыта роль системных факторов, обеспечивающих согласованность и воспроизводимость агропродовольственной системы как целостного механизма формирования продовольственной безопасности.

Литературный обзор. Вопрос продовольственной безопасности в последние десятилетия приобрел характер глобального приоритета и рассматривается как ключевая задача социально-экономического развития как развитых, так и развивающихся стран. При этом эмпирические исследования показывают, что высокий уровень экономического развития и наличие разветвленной системы аграрной поддержки не устраняют структурные уязвимости агропродовольственных систем. Так, на примере стран Европейского союза выявлено, что концентрация производства, неравномерное распределение поддержки и ослабление позиций малых производителей формируют долгосрочные риски для устойчивости продовольственной безопасности, несмотря на развитую институциональную среду [1].

Дополнительные сравнительные оценки достижения Цели устойчивого развития SDG-2 подтверждают, что даже среди экономически развитых стран сохраняются существенные различия в уровне продовольственной безопасности. Это указывает на ограниченность универсальных стратегических решений и необходимость учета совокупности структурных и институциональных факторов, определяющих характер функционирования агропродовольственных систем. Данный вывод находит подтверждение в исследованиях, подчеркивающих ключевую роль координации и согласованности действий участников системы в преодолении структурных ограничений продовольственной безопасности [2].

На национальном уровне большинство стран разрабатывают специализированные стратегии, программы и дорожные карты в сфере продовольственной безопасности, которые, как правило, выходят за рамки узкого аграрного регулирования и охватывают вопросы институционального развития, координации политики, поддержки фермерских хозяйств, развития кооперации и интеграции участников агропродовольственных цепочек. Вместе с тем в научных исследованиях подчеркивается, что наличие формальных стратегий и программ само по себе не гарантирует достижения устойчивых результатов, если механизмы их реализации характеризуются фрагментарностью и недостаточной согласованностью.

Ряд исследований показывает, что отсутствие согласованности между уровнями управления существенно снижает результативность политики в сфере продовольственной безопасности. Анализ многоуровневого управления аграрными системами свидетельствует о том, что универсальные регуляторные инструменты, реализуемые на национальном уровне, нередко вступают в противоречие с локальными институциональными практиками. Это ограничивает адаптационный потенциал производителей и препятствует устойчивому функционированию агропродовольственных систем [3].

В этой связи в современной литературе усиливается интерес к системному анализу факторов формирования продовольственной безопасности, включая характер взаимодействия между участниками агропродовольственной системы, формы координации и согласования интересов, а также качество институциональной среды. Такой подход позволяет рассматривать продовольственную безопасность не только как результат производства и распределения ресурсов,

но и как следствие функционирования агропродовольственной системы в целом.

Современные исследования все чаще трактуют продовольственную безопасность как результат функционирования агропродовольственной системы, в которой ключевую роль играют не только объемы сельскохозяйственного производства, но и системные факторы, определяющие согласованность, устойчивость и воспроизводимость агропродовольственных процессов. Данный подход отражает переход от узкого понимания продовольственной безопасности как физической доступности продовольствия к системному анализу устойчивости и координации на различных уровнях управления.

Ряд работ подчеркивает, что влияние институциональной среды на показатели продовольственной безопасности носит опосредованный характер и во многом определяется согласованностью действий и механизмов управления в условиях кризисов. Анализ продовольственной безопасности в странах Западных Балкан показывает, что фрагментарность политики и недостаточная координация между уровнями управления усиливают уязвимость агропродовольственных систем и ограничивают результативность мер государственной поддержки даже при наличии формальных стратегий и программ [4].

Существенное внимание в литературе уделяется анализу форм взаимодействия и координации экономических агентов в агропродовольственных цепочках. Исследование аграрных социальных сервисов в Китае демонстрирует, что специализированные сервисные организации и кооперативные структуры выступают важным системным фактором повышения устойчивости продовольственного производства, способствуя интеграции мелких производителей в современные производственные и рыночные процессы и повышая эффективность использования ресурсов [5].

Отдельное направление исследований связано с анализом распределения выгод и рисков между участниками агропродовольственной системы. В этом контексте категория справедливости (fairness) рассматривается как один из системных факторов устойчивости продовольственных систем. Подчеркивается, что асимметрия рыночной власти, информационные дисбалансы и исключение уязвимых групп производителей из цепочек создания стоимости подрывают потенциал продовольственной безопасности даже при наличии формальных регуляторных механизмов [6].

В казахстанской научной литературе продовольственная безопасность рассматривается преимущественно в контексте структурных и институциональных ограничений развития агропродовольственной системы. Авторы отмечают, что при наличии значительного сельскохозяйственного потенциала сохраняется высокая зависимость внутреннего рынка от импорта по ряду ключевых товарных позиций, а продовольственная безопасность формируется в условиях выраженной региональной неоднородности, обусловленной различиями в производственном потенциале, логистической обеспеченности и уровне социально-экономического развития территорий [7–9]. Эти факторы усиливают уязвимость агропродовольственной системы к внешним шокам и ценовым колебаниям.

Значительное место в отечественных исследованиях занимает анализ экономической доступности продовольствия. Высокая доля расходов домохозяйств на продукты питания в ряде регионов свидетельствует о сохранении рисков продовольственной уязвимости населения. Подтверждается действие закона Энгеля, в соответствии с которым рост доходов сопровождается снижением доли расходов на продовольствие, что позволяет рассматривать структуру потребления как важный индикатор продовольственной безопасности и социально-экономического развития [9]. Одновременно выявляется региональное неравенство, указывающее на недостаточную согласованность аграрной, социальной и региональной политики [10–11].

Методологические аспекты оценки продовольственной безопасности также остаются предметом активной научной дискуссии. Анализ используемых индикаторов показывает, что

в большинстве исследований доминируют показатели доступности и стоимости продовольствия, тогда как институциональные, организационные и экологические параметры часто остаются вне поля системного анализа. Это ограничивает возможности комплексной оценки системных факторов формирования продовольственной безопасности [12].

Анализ научных источников показывает, что продовольственная безопасность формируется под воздействием совокупности системных факторов, определяющих характер функционирования агропродовольственной системы. Несмотря на значительный массив исследований, в литературе сохраняется фрагментарность в анализе взаимосвязи между институциональной средой, формами взаимодействия участников и результатами продовольственной безопасности, что обуславливает необходимость дальнейшего системного анализа применительно к национальным условиям.

Материалы и методы. В рамках настоящего исследования использован комплексный методологический подход, основанный на сочетании системного анализа, институционального анализа и сравнительного анализа. Такой выбор методов обусловлен пониманием продовольственной безопасности как результата действия совокупности системных факторов, формируемых в процессе функционирования агропродовольственной системы под воздействием экономических, институциональных и организационно-координационных условий.

Информационную базу исследования составили материалы международных и национальных организаций, научные публикации, статистические данные и официальные документы, отражающие различные аспекты формирования продовольственной безопасности. В частности, использованы аналитические и статистические материалы ФАО, Всемирного банка и ОЭСР, а также результаты эмпирических и обзорных исследований, опубликованных в рецензируемых научных журналах. Для анализа национальной специфики продовольственной безопасности Республики Казахстан привлечены данные официальной статистики, отраслевые обзоры, аналитические отчеты и публикации отечественных исследователей.

Методы исследования. Ключевым методологическим инструментом исследования выступает системный анализ, позволяющий рассматривать продовольственную безопасность как результат взаимодействия взаимосвязанных элементов агропродовольственной системы, включая производство, переработку, распределение, институциональную среду и механизмы координации участников. Использование системного подхода обеспечивает возможность выявления не отдельных факторов, а их совокупного влияния на устойчивость и воспроизводимость продовольственного обеспечения.

Институциональный анализ применен для оценки роли формальных и неформальных институтов, механизмов координации и организационных условий, которые выступают системными факторами формирования продовольственной безопасности. В рамках данного метода внимание уделено не отдельным инструментам государственной поддержки, а характеру институциональной архитектуры и степени согласованности действий участников агропродовольственной системы.

Сравнительный анализ использован для сопоставления международных и национальных подходов к обеспечению продовольственной безопасности, а также для выявления общих и специфических закономерностей функционирования агропродовольственных систем в различных институциональных и экономических условиях. Это позволило рассмотреть системные факторы формирования продовольственной безопасности в более широком контексте и избежать узконациональной интерпретации результатов.

В целях систематизации научных подходов и выявления ключевых направлений исследовательской дискуссии применен контент-анализ научных публикаций, посвященных проблемам продовольственной безопасности, продовольственного суверенитета и устойчивости агропродовольственных систем. Особое внимание

уделялось работам, рассматривающим вопросы координации, распределения выгод и рисков, а также организационных и институциональных условий функционирования агропродовольственных цепочек.

Анализ продовольственной безопасности в рамках исследования базируется на рассмотрении совокупности показателей физической и экономической доступности продовольствия, а также характеристик устойчивости агропродовольственных систем. При этом акцент сделан на интерпретации данных показателей через призму системных факторов, включая согласованность политики, уровень координации между участниками агропродовольственных цепочек и организационные условия воспроизводства продовольственного предложения. Такой подход позволяет выйти за рамки узкого анализа производственных показателей и рассматривать продовольственную безопасность как результат функционирования агропродовольственной системы в целом.

Следует отметить, что результаты исследования основаны преимущественно на вторичных данных и опубликованных научных источниках, что ограничивает возможности анализа неформальных институциональных практик и локальных механизмов взаимодействия. Вместе с тем использование междисциплинарного, системного и сравнительного подходов обеспечивает достаточную обобщаемость выводов и формирует методологическую основу для последующих эмпирических исследований, ориентированных на углубленный анализ системных факторов формирования продовольственной безопасности.

Обсуждение и результаты. В Республике Казахстан государственная поддержка агропромышленного комплекса формируется в рамках многоуровневой институциональной архитектуры, ориентированной на финансово-экономическое стимулирование предпринимательской деятельности в сельском хозяйстве. Базовыми инструментами такой поддержки выступают льготное налогообложение, субсидирование инвестиционных и текущих затрат, а также льготное кредитование сезонных сельскохозяйственных работ, что позволяет снизить финансовую нагрузку на субъекты АПК и обеспечить относительную стабильность производственного процесса.

Координация и реализация ключевых мер государственной поддержки осуществляется через систему квазигосударственных институтов развития, центральное место среди которых занимает Национальный управляющий холдинг Байтерек. В структуре холдинга сосредоточены специализированные организации, обеспечивающие доступ субъектов АПК к финансовым ресурсам, инвестициям и инструментам обновления материально-технической базы. К числу таких институтов относятся Аграрная кредитная корпорация, осуществляющая льготное кредитование и финансирование агробизнеса через различные финансовые каналы, а также КазАгроФинанс, специализирующаяся на лизинге сельскохозяйственной техники и оборудования.

Функциональная направленность указанных институтов свидетельствует о преобладании финансово-инструментального подхода к развитию агропромышленного комплекса, при котором основной акцент делается на расширение доступа субъектов агробизнеса к финансовым ресурсам, технологическую модернизацию и повышение производительности труда. При этом поддержка преимущественно ориентирована на отдельные хозяйствующие субъекты, тогда как формирование устойчивой связанности между производственными, перерабатывающими и сбытовыми звеньями агропродовольственной системы рассматривается как вторичный результат, а не как самостоятельное направление государственной политики.

В результате сложившаяся модель государственной поддержки АПК создает базовые условия для сохранения производственного потенциала отрасли, однако в ограниченной степени способствует развитию системных факторов устойчивости агропродовольственной системы. Это формирует зависимость продовольственной безопасности от масштабов бюджетной поддержки и снижает роль встроенных механизмов взаимодействия и воспроизводства связей между звеньями агропродовольственных цепочек в долгосрочной перспективе.

Таблица 1 - Институциональная архитектура государственной поддержки агропромышленного комплекса Республики Казахстан

№	Институт/ организация	Основные инструменты поддержки	Целевая группа получателей	Направленность воздействия	Потенциальный вклад в обеспечение продовольственной безопасности
1	Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан	Субсидирование инвестиционных затрат; субсидирование процентных ставок по кредитам и лизингу; льготное кредитование весенне-полевых и уборочных работ	Субъекты АПК, фермерские и крестьянские хозяйства, агропредприятия	Производство, финансирование	Стабилизация сельскохозяйственного производства и снижение финансовых рисков аграрного сектора
2	Национальный управляющий холдинг Байтерек	Координация и реализация финансовых инструментов поддержки через дочерние организации	Субъекты АПК, малый и средний агробизнес	Финансирование, институциональная координация	Формирование централизованной системы доступа к финансовым ресурсам и повышение устойчивости агропродовольственной системы
3	Аграрная кредитная корпорация	Льготное кредитование; субсидирование ставок вознаграждения; финансирование через кредитные товарищества, МФО и банки второго уровня	Субъекты АПК, МСП, фермерские хозяйства	Финансирование, производство	Расширение охвата агробизнеса финансовыми услугами и поддержание непрерывности производственного цикла
4	КазАгроФинанс	Лизинг сельскохозяйственной техники и оборудования; кредитование	Субъекты АПК, сельхозпроизводители	Техническое оснащение, производство	Обновление материально-технической базы и повышение производительности сельского хозяйства
5	Финансовые институты-партнеры (банки второго уровня, МФО, лизинговые компании)	Со-финансирование, кредитование и реализация льготных программ через институциональные каналы	Малый и средний агробизнес, фермерские хозяйства	Финансирование	Повышение доступности финансовых ресурсов и снижение институциональных барьеров входа в отрасль

Примечание - составлено авторами на основе анализа нормативно-правовых актов, официальных материалов Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан и данных квазигосударственных институтов развития.

В условиях преобладания финансово-инструментального подхода особое значение приобретает анализ механизмов взаимодействия и интеграции как одного из системных факторов, дополняющих меры финансовой поддержки и влияющих на устойчивость агропродовольственной системы. В отличие от поддержки, ориентированной преимущественно на отдельные хозяйствующие субъекты, такие механизмы связаны с формированием устойчивой связанности между производственными, перерабатывающими, логистическими и сбытовыми звеньями, а также с вовлечением финансовых и научных организаций в единое пространство взаимодей-

ствия.

Механизмы взаимодействия в агропродовольственной системе проявляются в устойчивых формах согласования интересов экономических агентов на различных стадиях создания продовольственной стоимости. В отличие от разрозненных рыночных трансакций, они опираются на повторяемость взаимодействий, распределение рисков и выгод и наличие формальных либо неформальных правил, обеспечивающих согласованность действий участников. В условиях высокой неопределенности и уязвимости агропродовольственных цепочек такие формы взаимодействия выступают не только источником повышения эффективности, но и важным системным фактором устойчивости продовольственной безопасности.

Исследования, посвященные анализу взаимодействия участников агропродовольственной системы Республики Казахстан, показывают, что на практике такие формы взаимодействия характеризуются фрагментарностью и низкой устойчивостью [13]. Несмотря на наличие значительного числа сельскохозяйственных производителей, прежде всего малых и средних хозяйств, их включенность в процессы переработки и сбыта продукции остается ограниченной. Существующие формы взаимодействия, как правило, носят ситуативный характер и зависят от доступа к государственным мерам поддержки либо отдельных рыночных возможностей, не формируя устойчивой связанности между звеньями агропродовольственных цепочек.

С позиций обеспечения продовольственной безопасности данная особенность имеет принципиальное значение. Недостаточная связанность и слабая воспроизводимость взаимодействий между звеньями агропродовольственной системы приводят к разрывам в цепочках создания продовольственной стоимости, росту трансакционных издержек и снижению адаптационного потенциала системы. Малые производители оказываются ограниченно вовлеченными в переработку и распределение продукции, что сдерживает устойчивость продовольственного предложения и усиливает зависимость внутреннего рынка от внешних поставок по ряду товарных позиций.

Кооперативные и сетевые формы взаимодействия, рассматриваемые в научной литературе как важный элемент устойчивых агропродовольственных систем, в казахстанских условиях преимущественно выполняют вспомогательную роль и не встроены в систему обеспечения продовольственной безопасности как самостоятельный системный компонент. В отличие от моделей, в которых такие формы взаимодействия используются для стабилизации доходов производителей, сглаживания региональных диспропорций и обеспечения непрерывности поставок, в Республике Казахстан они чаще проявляются как производный элемент финансовой поддержки, а не как инструмент долгосрочной организации и согласования агропродовольственных процессов.

В результате элементы согласования и интеграции в агропродовольственной системе Республики Казахстан в настоящее время не выполняют системообразующую функцию в формировании продовольственной безопасности. Их ограниченная встроенность в общую логику функционирования системы снижает устойчивость агропродовольственных цепочек и усиливает уязвимость продовольственного обеспечения к внешним и внутренним шокам. В этой связи формирование устойчивой связанности и воспроизводимости взаимодействий между ключевыми звеньями агропродовольственной системы следует рассматривать как одно из приоритетных направлений повышения устойчивости продовольственной безопасности в долгосрочной перспективе.

Выявленные ограничения актуализируют необходимость обращения к зарубежным концептуальным моделям, в которых устойчивость продовольственного обеспечения трактуется как результат согласованного функционирования агропродовольственной системы в целом. В международных исследованиях все более широкое распространение получает системный подход, рассматривающий продовольственную безопасность не как функцию отдельных отраслей

или инструментов поддержки, а как следствие качества организации, связанности и согласованности процессов производства, переработки, распределения и потребления продовольствия. В этом контексте особый интерес представляет концептуальная рамка устойчивости агропродовольственных систем, предложенная ФАО, позволяющая структурировать ключевые системные характеристики устойчивости в условиях внешних и внутренних шоков (рисунок 1).

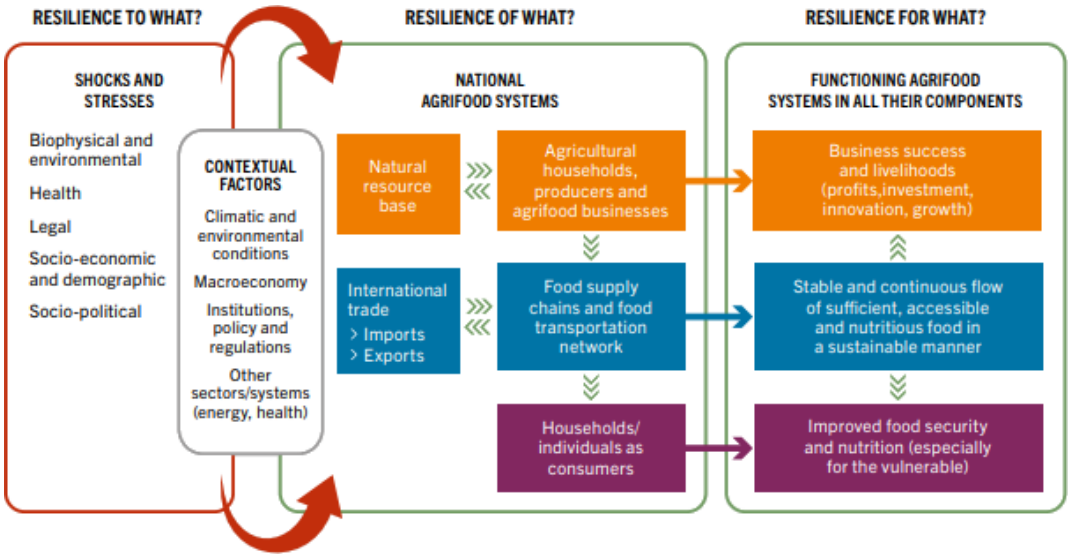


Рис.1 - Концептуальная рамка анализа устойчивости агропродовольственных систем
Примечание – источник [14]

В соответствии с данной концептуальной рамкой устойчивость агропродовольственной системы интерпретируется как ее способность сохранять функциональность и восстанавливаться после воздействия шоков за счет сочетания устойчивости к возмущениям, способности к поглощению негативных эффектов, скорости восстановления и адаптивности. Как показано на рисунке 2, уровень продовольственной безопасности во времени определяется не столько масштабами самого шока, сколько состоянием системных факторов, обеспечивающих избыточность связей, гибкость цепочек поставок и согласованность функционирования агропродовольственной системы.

В рамках данной модели именно совокупность взаимосвязанных элементов системы определяет глубину снижения продовольственной безопасности в период кризисных воздействий и скорость последующего восстановления. Недостаточная развитость таких системных характеристик, напротив, приводит к более выраженному снижению устойчивости и усиливает зависимость продовольственного обеспечения от внешних факторов и экстренных мер государственной поддержки.

Сопоставление представленных концептуальных моделей устойчивости агропродовольственной системы с практикой Республики Казахстан показывает, что ключевые системные характеристики, определяющие устойчивость системы - избыточность связей, гибкость цепочек поставок и адаптивность взаимодействия между звеньями, в национальной модели выражены в ограниченной степени. При доминировании финансово-инструментальных мер государственной поддержки устойчивость продовольственного обеспечения в большей мере зависит от масштабов бюджетного финансирования и административных решений, чем от встроенных механизмов воспроизводства связей внутри агропродовольственной системы, что соответствует траектории менее устойчивой системы, представленной на концептуальной кривой.

В целом результаты исследования позволяют рассматривать характер организации агропродовольственной системы, модель государственной поддержки и степень связанности ее ключевых звеньев как системные факторы формирования продовольственной безопасности, определяющие устойчивость и адаптационный потенциал системы в условиях внешних и внутренних шоков.

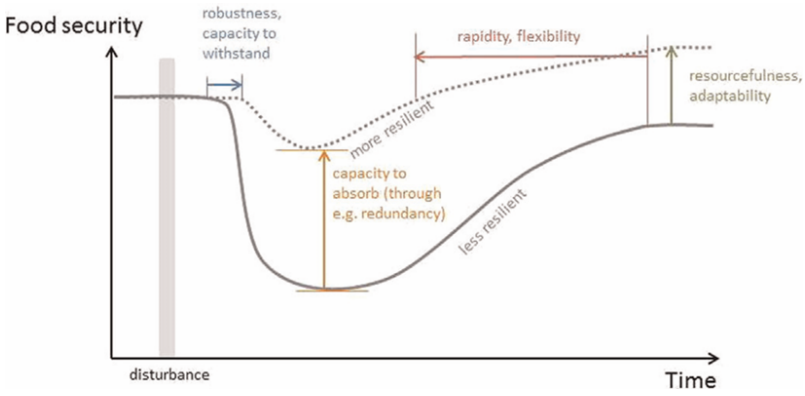


Рис.2 - Устойчивость продовольственной системы как способность обеспечивать продовольственную безопасность во времени в условиях внешних возмущений
Примечание – источник [15]

Выводы. Проведенное исследование показало, что продовольственная безопасность в современных условиях формируется не как прямое следствие объемов сельскохозяйственного производства или масштабов государственной поддержки, а как результат функционирования агропродовольственной системы в целом, определяемого совокупностью системных факторов. К числу таких факторов относятся характер институциональной архитектуры, степень согласованности и воспроизводимости взаимодействий между ключевыми звеньями агропродовольственных цепочек, а также наличие встроенных механизмов адаптации к внешним и внутренним шокам.

Установлено, что в Республике Казахстан модель обеспечения продовольственной безопасности в значительной степени опирается на финансово-инструментальный подход, ориентированный на поддержку отдельных хозяйствующих субъектов. Данная модель позволяет поддерживать производственный потенциал агропромышленного комплекса и снижать краткосрочные финансовые риски, однако в ограниченной степени способствует формированию устойчивой связанности между производственными, перерабатывающими и сбытовыми звеньями агропродовольственной системы. В результате устойчивость продовольственного обеспечения во многом зависит от масштабов бюджетной поддержки и административных решений.

Показано, что механизмы кооперации, сетевого взаимодействия и партнерских связей в агропродовольственной системе Республики Казахстан носят фрагментарный характер и не выполняют системообразующей функции. Ограниченная интеграция малых и средних производителей в процессы переработки и распределения продукции снижает адаптационный потенциал агропродовольственной системы и усиливает ее уязвимость к ценовым, логистическим и институциональным шокам.

На основе полученных результатов авторами предложена обобщающая схема формирования продовольственной безопасности агропродовольственной системы, отражающая взаимосвязь институциональной архитектуры, форм взаимодействия участников и характеристик устойчивости системы (рисунок 3).

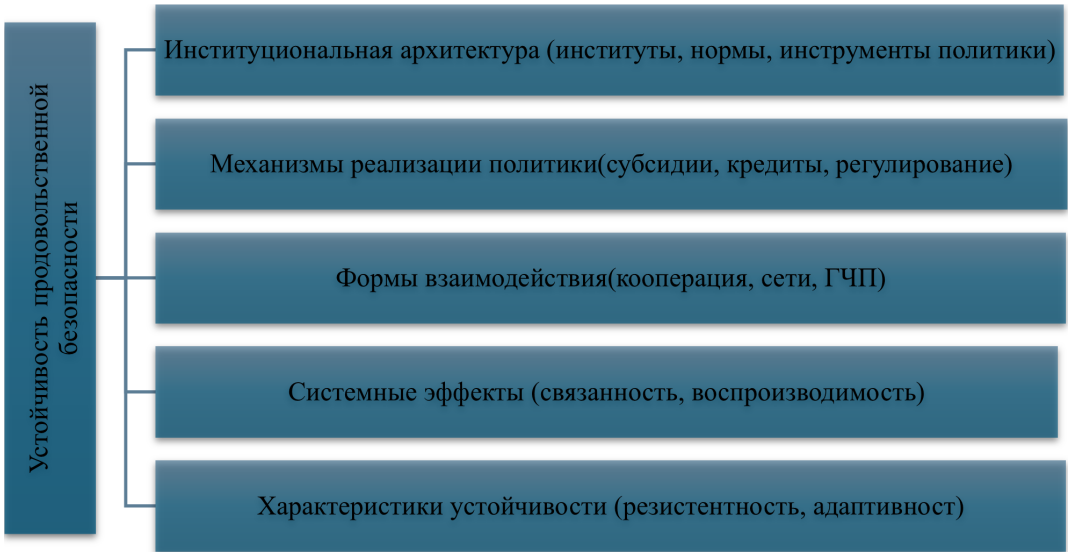


Рис.3 - Схема формирования устойчивости продовольственной безопасности агропродовольственной системы

Примечание - составлено авторами

Сопоставление национальной практики с концептуальной рамкой устойчивости агропродовольственных систем ФАО позволило установить, что ключевые характеристики устойчивости - избыточность связей, гибкость цепочек поставок и адаптивность взаимодействий - выражены в национальной модели в ограниченной степени, что обуславливает зависимость восстановления продовольственной безопасности в кризисные периоды от экстренных мер государственной поддержки.

С практической точки зрения полученные результаты указывают на необходимость смещения акцентов государственной аграрной политики от преимущественно финансово-инструментальной поддержки отдельных хозяйствующих субъектов к формированию устойчивых механизмов координации и интеграции участников агропродовольственных цепочек. Речь идет не о замещении действующих мер поддержки, а о их институциональном дополнении за счет развития кооперативных, сетевых и партнерских форм взаимодействия между производственными, перерабатывающими, логистическими и сбытовыми звеньями. Усиление таких механизмов позволяет повысить воспроизводимость связей внутри агропродовольственной системы, снизить трансакционные издержки и повысить адаптационный потенциал продовольственного обеспечения в условиях внешних и внутренних шоков, что имеет принципиальное значение для долгосрочной устойчивости продовольственной безопасности Республики Казахстан.

Литература

1. Moreno-Pérez, O. M., Arnalte-Mur, L., Cerrada-Serra, P., Sumpsi-Viñas, J., & Ortiz-Miranda, D. Actions to strengthen the contribution of small farms and small food businesses to food security in Europe// Food Security. - 2024.- Vol.16(1). - P.243–259. DOI 10.1007/s12571-023-01421-0.

2. Smyth S.J., Webb S.R., Phillips P.W.B. The role of public-private partnerships in improving global food security//Global Food Security. - 2021. -Vol 31:100588. DOI 10.1016/j.gfs.2021.100588.

3. Sidibé A., Totin E., Thompson-Hall M., Obisis L., Traoré P.C. Multi-scale governance in agricultural systems: Interplay between national and local institutions around the production dimension of food

security in Mali // NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences. -2018.-Vol.84.- P.94-102. DOI 10.1016/j.njas.2017.09.001.

4. Jambor A., Varga Á. Food security and crises: evidence from the Western Balkans // Agriculture & Food Security.- 2025.-Vol.13(1). DOI 10.1007/s40066-024-00514-z.

5. Cai B., Wang L., Shi F., Abate M. C., Geremew B., & Addisu, A. K. (2024). Agricultural socialized services and Chinese food security: Examining the threshold effect of land tenure change//Frontiers in Sustainable Food Systems. - 2024.-Vol.8:1371520. DOI 10.3389/fsufs.2024.1371520.

6. Onyeaka H., et al. Achieving fairness in the food system// Food and Energy Security. - 2024.- Vol.13(4): e572. DOI 10.1002/fes3.572.

7. Дуламбаева Р., Жунусова А. Оценка продовольственной безопасности Казахстана по компонентам доступности // Мемлекеттік басқару және мемлекеттік қызмет. - 2024. - № 1(88). - С.175-188. DOI 10.52123/1994-2370-2024-1176.

8. Дедкова Е.Г., Коростелкина И.А., Жидова О.П. Актуальные аспекты обеспечения продовольственной безопасности // Journal of Economic Research & Business Administration. - 2019. -№ 3 (129). - С.172-187. DOI 10.26577/be-2019-3-e15.

9. Беделбаева А.Е., Шарипов А.К., Досумова Ж.С. ЕАЭО жағдайында Қазақстанның азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету // Аграрлық нарық проблемалары. -2021. - № 3. - С.24-30 DOI 10.46666/2021-3.2708-9991.02.

10. Jumabayev S., Dulambayeva R., Kussainova L., Yesmagambetov D. Approaches to assessing the food security of the regions of Kazakhstan in modern conditions // Public Policy and Administration. - 2023.- Vol. 22(4) - P.503-518.

11. Нурланова Н.К., Альжанова Ф.Г., Днишев Ф.М. (2023). Методы и практика оценки уровня инклюзивного регионального развития Казахстана. Экономика: стратегия и практика. - № 18(4). - С.109-126, DOI 10.51176/1997-9967-2023-4-109-126

12. Cadavid, L., Arulnathan, V., Pelletier, N. (2024). Food security and food sovereignty: A review of commonly used indicators and consideration of environmental sustainability aspects//Sustainability. -2024.-Vol. 16(24): 11034. DOI 10.3390/su162411034

13. Юсупова С., и др. «Формирование предпринимательских сетей в агропромышленном комплексе Казахстана: институциональные и организационные предпосылки»//Вестник КазУТБ. -2025. -№ 2(27). - С. 571-584. DOI 10.58805/kazutb.v.2.27-1011.

14. FAO.2021. In Brief the State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses// Rome, Italy. - 2021. - 28p. DOI 10.4060/cb7351en.

15. Tendall, D. M., Joerin, J., Kopainsky, B., Edwards, P., Shreck, A., Le, Q. B., Kruetli, P., & Grant, M. (2015). Food system resilience: Defining the concept//Global Food Security. -2015.-Vol.6.- P.17-23. DOI 10.1016/j.gfs.2015.08.001.

References

1. Moreno-Pérez, O. M., Arnalte-Mur, L., Cerrada-Serra, P., Sumpsi-Viñas, J., & Ortiz-Miranda, D. Actions to strengthen the contribution of small farms and small food businesses to food security in Europe// Food Security. - 2024.- Vol.16(1). - P. 243–259. DOI 10.1007/s12571-023-01421-0.

2. Smyth S.J., Webb S.R., Phillips P.W.B. The role of public-private partnerships in improving global food security//Global Food Security. - 2021.-Vol 31:100588. DOI 10.1016/j.gfs.2021.100588.

3. Sidibé A., Totin E., Thompson-Hall M., Obisis L., Traoré P.C. Multi-scale governance in agricultural systems: Interplay between national and local institutions around the production dimension of food security in Mali // NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences. -2018.-Vol. 84.- P. 94-102. DOI 10.1016/j.njas.2017.09.001.

4. Jambor A., Varga Á. Food security and crises: evidence from the Western Balkans // Agriculture & Food Security.- 2025.-Vol.13(1). DOI 10.1007/s40066-024-00514-z.

5. Cai B., Wang L., Shi F., Abate M. C., Geremew B., & Addisu, A. K. (2024). Agricultural socialized services and Chinese food security: Examining the threshold effect of land tenure change//Frontiers in Sustainable Food Systems. - 2024.-Vol. 8:1371520. DOI 10.3389/fsufs.2024.1371520.

6. Onyeaka H., et al. Achieving fairness in the food system// Food and Energy Security. - 2024.- Vol.13(4): e572. DOI 10.1002/fes3.57.

7. Dulambaeva R., Zhunusova A. Ocenka prodovol'stvennoj bezopasnosti Kazahstana po komponentam dostupnosti // Memlekettik basқaru zhəne memlekettik қyzmet. - 2024. - № 1(88). - S. 175-188. DOI 10.52123/1994-2370-2024-1176. [in Russian]

8. Dedkova E.G., Korostelkina I.A., Zhidova O.P. Aktual'nye aspekty obespechenija prodovol'stvennoj bezopasnosti // Journal of Economic Research & Business Administration. - 2019. -№ 3 (129). - S. 172-187. DOI 10.26577/be-2019-3-e15. [in Russian]

9. Bedelbaeva A.E., Sharipov A.K., Dosumova Zh.S. EAJeO zhaғdajynda Қazaқstannyң azyқ-tүlik қauipsizdigin қamtamasyz etu // Agrarlyқ naryқ problemalary. -2021. - № 3. - S.24-30 DOI 10.46666/2021-3.2708-9991.02. [in Kazakh]

10. Jumabayev S., Dulambayeva R., Kussainova L., Yesmagambetov D. Approaches to assessing the food security of the regions of Kazakhstan in modern conditions // Public Policy and Administration. - 2023.- Vol. 22(4) - P. 503-518.

11. Nurlanova N.K., Al'zhanova F.G., Dnishev F.M. (2023). Metody i praktika ocenki urovnja inkljuzivnogo regional'nogo razvitija Kazahstana. Jekonomika: strategija i praktika. - № 18(4). - S.109-126, DOI 10.51176/1997-9967-2023-4-109-126. [in Russian]

12. Cadavid, L., Arulnathan, V., Pelletier, N. (2024). Food security and food sovereignty: A review of commonly used indicators and consideration of environmental sustainability aspects//Sustainability. -2024.-Vol. 16(24): 11034. DOI 10.3390/su162411034.

13. Jusupova S., i dr. «Formirovanie predprinimatel'skih setej v agropromyshlennom komplekse Kazahstana: institucional'nye i organizacionnye predposylki»//Vestnik KazUTB. -2025. -№ 2(27). - S. 571-584. DOI 10.58805/kazutb.v.2.27-1011. [in Russian]

14. FAO. 2021. In Brief the State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses// Rome, Italy. - 2021.- 28p. DOI 10.4060/cb7351en.

15. Tendall, D. M., Joerin, J., Kopainsky, B., Edwards, P., Shreck, A., Le, Q. B., Kruetli, P., & Grant, M. (2015). Food system resilience: Defining the concept//Global Food Security. -2015.-Vol.6.- P. 17-23. DOI 10.1016/j.gfs.2015.08.001.

Сведения об авторах

Шильманова А.М.- кандидат экономических наук, Кызылординский университет им. Коркыт Ата, Кызыорда, Казахстан, e-mail: altynajsilmanova1@gmail.com;

Ибраева Г.А.- магистр экономических наук, Кызылординский университет им. Коркыт Ата, Кызыорда, Казахстан, e-mail: ibraevagulajym@gmail.com;

Шайнуров А.С.- кандидат экономических наук, Кызылординский университет им. Коркыт Ата, Кызыорда, Казахстан,

e-mail: kaup@mail.ru;

Иляшова Г.Ж.- PhD, Казахский национальный университет им. аль-Фараби г. Алматы, Казахстан, e-mail: ilyashova.g@kaznu.kz;

Юсупова С.А.- кандидат экономических наук, Казахской национальной академии хореографии, e-mail: Abay.saltanat@bk.ru;

Тұңғышбай С.Ғ.- магистр технологических наук, докторант, Кызылординский университет им.- Коркыт Ата, Кызылорда, e-mail: macqara@gmail.com.

Information about the authors

Shilmanova A.M.- candidate of economic sciences, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, e-mail: a.shilmanova@bk.ru;

Ibraeva G.- master of Economic Sciences, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, e-mail: ibraevagulajym@gmail.com;

Shainurov A.S.- candidate of economic sciences, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, e-mail: kaup@mail.ru;

Ilyashova G. K.- PhD, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: ilyashova.g@kaznu.kz;

Yusupova S. A.- candidate of economic sciences, Kazakh National Academy of Choreography, e-mail: Abay.saltanat@bk.ru;

Tungyshbai S. G.- master of Technological Sciences, doctoral student, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, e-mail: macqara@gmail.com.

IRSTI 06.58.30 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1313**

THE NATURAL RESOURCE CURSE IN KAZAKHSTAN: ECONOMIC AND STRUCTURAL PROBLEMS AND SOLUTION PROPOSALS

[1]G.P. Koptayeva, [2]A.B. Mukhamedkhanova✉, [3]A.N. Issakhmetova, [1]G.A. Myrzalieva, [4]A.A. Mutaliyeva, [5]D.N. Kelesbayev

[1]Miras University, Shymkent, Kazakhstan,
[2]M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan,
[3]Central-Asian Innovation University, Shymkent, Kazakhstan,
[4]Regional Innovation University, Shymkent, Kazakhstan,
[5]Akhmet Yassawi University, Turkestan, Kazakhstan

✉ *Correspondent-author: Dia-2808@mail.ru*

This study aims to analyze the structural vulnerabilities caused by Kazakhstan' s natural resource-based economic structure and to identify transformation requirements for sustainable development. The research conducted a literature review based on secondary data and utilized SWOT and PEST analyses to assess the country' s internal and external dynamics. The findings demonstrate that Kazakhstan' s economic growth is largely dependent on oil and natural gas revenues, leading to fundamental problems such as a lack of economic diversification, inadequate institutional capacity, and high vulnerability to external shocks. Theoretically, consistent with the natural resource curse, the Dutch disease, and the linkage theory, Kazakhstan has achieved limited success in transforming its natural resource wealth into sustainable development. Comparisons with the examples of Norway, Canada, and Botswana reveal that successful countries have transformed resource dependency into an opportunity through strong institutional structures, transparent revenue management, and economic diversification. For Kazakhstan, institutional reforms, human capital investments, and green economy strategies are highlighted as priority policy areas. Based on the data provided by SWOT and PEST analyses, the research systematically examines the main threats and potential opportunities Kazakhstan faces on its path to sustainable development. The results point to the need for multidimensional policy interventions to transform natural resource wealth into a development advantage. In this context, recommendations are presented as strategic roadmaps for policymakers and academia.

Keywords: natural resource curse, economic diversification, institutional capacity, SWOT analysis, PEST analysis, sustainable development, Dutch disease, Kazakhstan economy.

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ТАБИҒИ РЕСУРСТАРДЫҢ ҚАРҒЫСЫ: ЭКОНОМИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ МӘСЕЛЕЛЕР ЖӘНЕ ШЕШІМ ҰСЫНЫСТАРЫ

[1]Г.П. Коптаева, [2]А.Б. Мухамедханова✉, [3]А.Н. Исахметова, [1]Г.А. Мырзалиева, [4]А.А. Муталиева, [5]Д.Н. Келесбаев

[1]Мирас университеті, Шымкент, Қазақстан,
[2]М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан,
[3]Орталық Азия инновациялық университеті, Шымкент, Қазақстан,
[4]Аймақтық инновациялық университеті, Шымкент, Қазақстан,
[5]Ахмет Ясауи университеті, Түркістан, Қазақстан,
e-mail: Dia-2808@mail.ru

Бұл зерттеудің мақсаты-Қазақстанның табиғи ресурстарға негізделген экономикалық құрылымынан туындаған құрылымдық осалдықтарды талдау және тұрақты даму үшін трансформация талаптарын анықтау. Зерттеу барысында екінші реттік деректерге негізделген әдебиеттерге шолу жасалды және елдің ішкі және сыртқы динамикасын бағалау үшін SWOT және PEST талдаулары қолданылды. Зерттеу нәтижелері Қазақстанның экономикалық өсуі көбінесе мұнай мен табиғи газ

кірістеріне тәуелді екенін көрсетеді, бұл экономикалық әртараптандырудың болмауы, институционалдық әлеуеттің жеткіліксіздігі және сыртқы соққыларға жоғары осалдығы сияқты іргелі мәселелерге әкеледі. Теориялық тұрғыдан алғанда, табиғи ресурстардың қарғысына, голланд ауруына және байланыс теориясына сәйкес, Қазақстан өзінің табиғи ресурстарға байлығын тұрақты дамуға айналдыруда шектеулі табысқа жетті. Норвегия, Канада және Ботсвананың мысалдарымен салыстыру табысты елдердің күшті институционалдық құрылымдар, ашық кірістерді басқару және экономикалық әртараптандыру арқылы ресурстарға тәуелділікті мүмкіндікке айналдырғанын көрсетеді. Қазақстан үшін институционалдық реформалар, адами капиталға инвестициялар және жасыл экономика стратегиялары басым саясат салалары ретінде белгіленген. SWOT және PEST талдаулары ұсынған деректерге сүйене отырып, зерттеу Қазақстанның тұрақты даму жолында кездесетін негізгі қауіптер мен әлеуетті мүмкіндіктерді жүйелі түрде зерттейді. Нәтижелер табиғи ресурстар байлығын даму артықшылығына айналдыру үшін көп өлшемді саяси араласулардың қажеттілігін көрсетеді. Осыған байланысты ұсыныстар саясаткерлер мен академиялық топтар үшін стратегиялық жол карталары ретінде ұсынылған.

Түйін сөздер: табиғи ресурстардың қарғысы, экономикалық әртараптандыру, институционалдық әлеует, SWOT талдауы, PEST талдауы, тұрақты даму, голланд ауруы, Қазақстан экономикасы.

ПРОКЛЯТИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ В КАЗАХСТАНЕ: ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕШЕНИЮ

[1]Г.П. Коптаева, [2]А.Б. Мухамедханова, [3]А.Н. Исахметова, [1]Г.А. Мырзалиева, [4]А.А. Муталиева, [5]Д.Н. Келесбаев

[1]Университет Мирас, Шымкент, Казахстан,
[2]Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
[3]Центрально-Азиатский инновационный университет, Шымкент, Казахстан,
[4]Региональный инновационный университет, Шымкент, Казахстан,
[5]Университет Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан,
e-mail: Dia-2808@mail.ru

Целью данного исследования является анализ структурной уязвимости, обусловленной ресурсоориентированной структурой экономики Казахстана, и определение необходимых преобразований для обеспечения устойчивого развития. В рамках исследования был проведен обзор литературы на основе вторичных данных, а также применены SWOT- и PEST-анализы для оценки внутренней и внешней динамики страны. Результаты показывают, что экономический рост Казахстана в значительной степени зависит от доходов от нефти и природного газа, что приводит к таким фундаментальным проблемам, как отсутствие экономической диверсификации, недостаточный институциональный потенциал и высокая уязвимость к внешним шокам. Теоретически, в соответствии с «ресурсным проклятием», «голландской болезнью» и теорией взаимосвязей, Казахстан добился ограниченных успехов в преобразовании своего богатства от природных ресурсов в устойчивое развитие. Сравнение с примерами Норвегии, Канады и Ботсваны показывает, что успешные страны преобразовали ресурсную зависимость в возможности благодаря сильным институциональным структурам, прозрачному управлению доходами и экономической диверсификации. Для Казахстана институциональные реформы, инвестиции в человеческий капитал и стратегии зеленой экономики выделены в качестве приоритетных направлений политики. На основе данных SWOT- и PEST-анализов исследование систематически рассматривает основные угрозы и потенциальные возможности, с которыми сталкивается Казахстан на пути к устойчивому развитию. Результаты указывают на необходимость многомерных политических мер для преобразования богатства природных ресурсов в преимущество в области развития. В этом контексте рекомендации представлены в виде стратегических дорожных карт для политиков и академических кругов.

Ключевые слова: проклятие природных ресурсов, экономическая диверсификация, институциональный потенциал, SWOT-анализ, PEST-анализ, устойчивое развитие, голландская болезнь, экономика Казахстана.

Introduction. Natural resources have historically played an important role in the economic development of many countries. However, in some cases, resource abundance may hinder long-term development by creating economic distortions, institutional weaknesses, and environmental challenges. This phenomenon is widely known in the literature as the “resource curse” [1,2].

Kazakhstan is one of the most resource-rich countries in Central Asia. Although natural resources have been an important source of economic growth, excessive dependence on the extractive sector has generated structural economic, social, and environmental challenges [3, 4].

After gaining independence, Kazakhstan faced major structural challenges during its transition to a market economy. Resource revenues became a key driver of economic growth; however, this dependence also contributed to structural imbalances, limited diversification, and institutional challenges [5- 7].

The aim of this study is to examine Kazakhstan’ s current economic structure and propose concrete strategic steps to reduce its dependence on natural resources and establish a sustainable economic structure. Within this framework, the study emphasizes that areas such as industrialization, education reforms, green transformation, foreign trade strategies, and institutional development offer potential solutions for Kazakhstan. Successful implementation of these strategies can contribute to Kazakhstan’ s long-term development goals by increasing its economic diversification.

To this end, strategic analytical approaches are proposed to support Kazakhstan in adopting a more balanced and sustainable development model by reducing its dependence on natural resources. In this context, SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) and PEST (Political, Economic, Social, Technological) analytical frameworks are employed in this study.

Within this framework, the study highlights several key policy areas including economic diversification, human capital development, green transformation, and international economic integration.

The following section outlines the theoretical foundations of the study. The relationship between natural resources and economic performance has been the subject of theoretical and empirical investigation for many years. Until the mid-20th century, the prevailing view was that abundant natural resources would foster development by accelerating industrialization. However, the Singer–Prebisch thesis a significant critique of this optimistic view. According to the Singer-Prebisch thesis, countries relying on primary commodity exports gradually become dependent on industrialized core countries due to unfavorable trends in their terms of trade. In other words, peripheral countries exporting raw materials find themselves increasingly disadvantaged by core countries importing processed industrial goods and face structural obstacles to development. These early discussions first highlighted the risks of natural resource-based growth strategies.

Modern literature has developed a number of theoretical approaches to explain the mechanisms by which natural resource shocks affect the economy. One of these approaches, the Dutch disease theory, suggests that large inflows of foreign currency from natural resource exports may appreciate the domestic currency and reduce the competitiveness of other sectors. This appreciation of the local currency leads to higher export prices for tradable sectors such as manufacturing and agriculture, leading to a contraction in production. Another approach, linkage theory, draws on the work of Albert Hirschman and emphasizes that industrialization will be limited if the natural resource sector cannot establish forward and backward linkages with other sectors [8]. Strong linkages imply that natural resource revenues

are channeled into investments in sectors such as manufacturing and services, thereby fostering economic expansion. If the natural resource sector remains an enclave within the economy and does not support other sectors, its growth potential is limited. Indeed, as some countries like Norway have successfully demonstrated, integrating natural resource sectors like oil with other sectors within a country can mitigate perceived negative effects and create a balanced development model.

Empirical findings on the natural resource curse are quite controversial. Many studies have found that natural resource abundance is negatively correlated with economic growth [1,4]. However, some argue in the literature that this relationship is not inevitable. Some economists argue that resource abundance can be a boon, that is, it can support growth, when the right policies are implemented [9,10]. Conversely, many other studies point to resource abundance as the primary cause of economic stagnation or contraction. Some researchers have even argued that the natural resource curse is the exception, not the rule: For example, Alssadek and Benhin [11] note that not all resource-rich countries experience the curse, while Wang et al. [12] and Herb [13] find no statistically significant link between natural resource abundance and low growth. However, the common thread across all these debates is the consensus on the decisive role of institutional factors. As nearly all researchers agree, strong and transparent institutions and a stable, diversified economic structure can mitigate the potential negative impacts of natural resources. Recent studies have shown that some countries (like Norway) have been able to leverage their wealth of natural resources thanks to favorable institutional environments, while others (like Nigeria) face economic hardship despite their abundance of resources due to weak institutions. This has contributed to a more balanced perspective in the literature.

Although numerous studies examine the macroeconomic effects of resource dependence, fewer studies integrate strategic analytical tools to evaluate both internal and external drivers of structural transformation.

The scientific novelty of this study lies in the integration of SWOT and PEST analytical frameworks with macroeconomic trend analysis in order to assess Kazakhstan’s resource dependency and identify structural transformation pathways.

This research contributes to the existing literature in three ways:

First, it provides an updated structural analysis of Kazakhstan’s resource-based economy using macroeconomic data covering the period from 1992 to 2024.

Second, the study integrates strategic management tools (SWOT and PEST analysis) with economic development theory to diagnose structural weaknesses and policy priorities.

Third, it develops a policy-oriented analytical framework that identifies key transformation pathways for Kazakhstan’s transition from a resource-dependent economy to a diversified and sustainable development model.

Materials and methods. After gaining independence in 1991, Kazakhstan experienced the throes of transitioning to a market economy until 1998. While real gross domestic product increased significantly with the rise in oil prices from 2000 onward, a structure dependent on natural resources emerged in terms of production, employment, and foreign trade. Therefore, this section will present the macroeconomic indicators of the Kazakh economy and analyze its dependence on natural resources in terms of production, employment, and foreign trade. The purpose of this analysis is to reveal the impact of production structure on the factors leading to the natural resource curse. In this context, a combination of macroeconomic indicators and Brent oil prices will provide a more useful analysis of the Kazakh economy (see Table 1).

Table 1 - Some Macroeconomic Indicators of Kazakhstan

Years	GDP (Billion Dollars)	Growth Rate (%)	Inflation (%)	Unemployment (%)
1992	3	-2,9	1381	n/a
1993	5	-9,2	1662,3	0,5
1994	12	-12,6	854,6	7,5
1995	17	-8,2	60,4	11,0
1996	21	0,5	28,7	13,0
1997	22	1,7	11,2	13,0
1998	22	-1,9	1,9	13,1
1999	17	2,7	17,8	13,5
2000	18	9,8	9,8	12,8
2001	22	13,5	6,4	10,4
2002	25	9,8	6,6	9,3
2003	31	9,3	6,8	8,8
2004	43	9,6	6,7	8,4
2005	57	9,7	7,6	8,1
2006	81	10,7	8,4	7,8
2007	105	8,9	18,8	7,3
2008	133	3,3	9,5	6,6
2009	115	1,2	6,2	6,6
2010	148	7,3	7,8	5,8
2011	193	7,5	7,4	5,4
2012	208	5,0	6,0	5,3
2013	237	5,9	4,8	5,2
2014	221	4,3	7,4	5,1
2015	184	1,0	13,6	5,0
2016	137	0,9	8,5	4,9
2017	167	3,9	7,1	4,9
2018	179	4,1	5,3	4,8
2019	182	4,5	5,4	4,8
2020	171	-2,6	7,5	4,9
2021	197	4,1	8,4	4,9
2022	226	3,3	20,3	4,9
2023	263	5,1	9,8	4,8
2024	293	3,5	8,0	4,8

Source: [14,15]

As shown in Table 1, Kazakhstan's macroeconomic data from 1992 to 2024 reveal the transformation and structural vulnerabilities of natural resource-based economies. Having newly gained independence in the early 1990s, the country experienced major economic contractions during the transitional economy. Negative growth, hyperinflation (e.g., 1662.3% in 1993) and double-digit unemployment rates are notable during the 1993-1995 period. Thanks to the growth model based on oil and natural gas exports in the post-2000 period, Kazakhstan' s GDP has increased significantly. GDP, which was $18 billion in 2000, rose to $237 billion in 2013. During this period, growth rates varied between 9-13%; however, inflation also remained in double-digits at times. The unemployment rate, on the other hand, showed a steady downward trend. After 2014, the growth rate slowed down due to the decline in oil prices, the ruble crisis and global fluctuations; GDP declined to $184 billion in 2015. Inflation rose to 13.6% in 2015, and growth nearly stalled (1.0%). This demonstrates that the Kazakh economy remains highly vulnerable to external shocks. After contracting by 2.6% in 2020 due to the pandemic, the economy recovered in subsequent years. Growth was recorded at 5.1% in 2023, with GDP reaching $263 billion. However, inflation reached a remarkable 20.3% in 2022, posing risks to the sustainability of price stability. Overall, these data demonstrate that Kazakhstan' s natural resource-based growth has provided short-term prosperity, but the economic structure remains vulnerable to external shocks. While GDP has increased, inflation has fluctuated, and weak institutional structures and production diversification have exacerbated fragility. Sustainable growth requires not only resource revenues but also structural transformation in the industrial and service sectors.

Accordingly, production diversification aimed to make Kazakhstan' s economic structure more balanced and sustainable. Growth in the agricultural and manufacturing sectors has helped to gradually reduce the share of natural resource revenues in GDP. Thanks to these diversification efforts, Kazakhstan has partially transitioned from an energy-based economy to a more diversified one. Beginning in the 2010s, driven by production diversification strategies, the share of Kazakhstan' s natural resource revenues in GDP has gradually declined, while the contributions of the agricultural and manufacturing sectors have increased. At the same time, the country' s economy has become less dependent on external resources, and the share of natural resource-based revenues has decreased (see Figure 1).

According to Figure 1, Kazakhstan' s economic growth is largely dependent on natural resources, particularly the oil and natural gas sector. Over the period spanning 1992-2024, the share of natural resource revenues in GDP has fluctuated depending on the country' s economic policies, global market conditions, and fluctuations in energy prices. Between these years, the Kazakh economy has followed a natural resource-based growth model, with the oil and natural gas sector serving as a key driver of the country' s economic development. The share of natural resource revenues in GDP peaked at over 66% in the mid-2000s, but this ratio has declined in subsequent years due to economic diversification policies and global market fluctuations. Although a significant decline was observed in the ratio of natural resource revenues to GDP in 2015, this ratio has risen again since 2020. It can be said that as of 2024, the economic contribution of natural resource revenues remains significant, but efforts to transform Kazakhstan' s economy into a more sustainable and diversified structure are ongoing.

After gaining independence in 1991, Kazakhstan implemented a series of reforms and strategies to achieve macroeconomic stability. The country' s primary objectives were to transition to a market economy, support economic growth, and maintain financial stability. Within this framework, the government developed various macroeconomic policies to control inflation, ensure fiscal discipline, and reduce budget deficits. Table 2 below lists the main macroeconomic policies implemented by Kazakhstan to control inflation, ensure fiscal discipline, and reduce budget deficits.

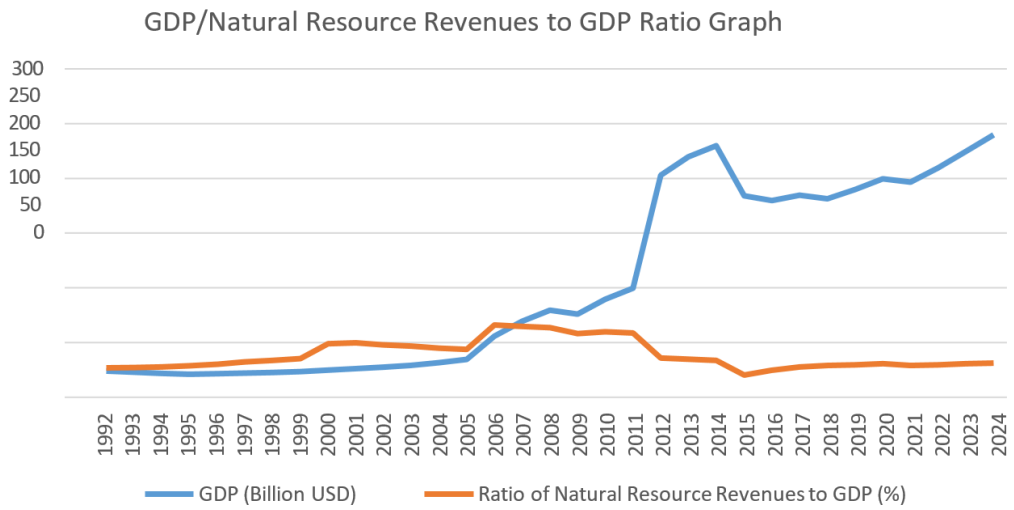


Fig.1 - GDP/Ratio of Natural Resource Revenues to GDP
Source: [14, 15]

Table 2 - Macroeconomic Policies Implemented by Kazakhstan

Policies	Explanations
Monetary Policy Improvements	To control inflation, the Central Bank increased interest rates and tightened the money supply.
Budget Discipline Practices	The government implemented policies that strengthened budget discipline to balance expenditures and revenues.
Fiscal Reforms	Reforms were implemented to review the tax system, broaden the tax base, and increase tax compliance.
Inflation Targeting	The Central Bank set a specific inflation target and shaped its monetary policies to achieve this target.
Restructuring Social Assistance	To reduce budget deficits, social assistance programs were reviewed, and regulations were implemented to ensure more efficient use of resources.
Expenditure Cuts	Public spending was cut and redirected to priority projects.
Policies to Encourage Domestic Production	Various incentives were provided to encourage domestic production, reduce foreign exchange demand, and reduce import dependency.
Control over Exchange Rates	The Central Bank intervened using its foreign exchange reserves to control exchange rate fluctuations.
Use of International Financing Sources	The aim was to secure and restructure financial resources through cooperation with international financial institutions.
Economic Stabilization Programs	Various economic stability programs were developed to control inflation and ensure fiscal discipline.

Note - Compiled by the authors

According to Table 2, following its independence, Kazakhstan pursued structural transformation through rapid economic reforms, transitioning to a market economy through privatization and tight monetary and fiscal policies. The Central Bank implemented policies to combat inflation

and stabilize the exchange rate, while fiscal management targeted budget discipline through tax reforms and incentives. Oil and natural gas revenues supported economic growth, but excessive dependence on these resources highlighted the need for economic diversification. The country aimed to diversify its economic structure by encouraging foreign direct investment and strengthening its human capital through investments in education, healthcare, and social security. Kazakhstan also implemented incentive packages to maintain stability in the face of global crises and pandemics and targeted sustainable growth with development plans for 2025. Based on this data and information, we can say that this research is based entirely on secondary data sources. A comprehensive literature review was conducted on the subject, examining academic sources (books, peer-reviewed articles, and theses). Additionally, reports and datasets published by international organizations (World Bank, IMF, UNDP, EBRD, etc.) on the Kazakh economy were evaluated. Official statistics provided by the National Statistical Institute of Kazakhstan, investor bulletins, and economic analysis reports were also used in the data collection process. This secondary data, compiled from diverse and reliable sources, provided a solid basis for the study' s analyses.

The conceptual framework of the research was established through a systematic review of the relevant literature. Within this scope, concepts such as the "natural resource curse" and "Dutch disease," which explain the effects of natural resource wealth on economic development, as well as theoretical approaches such as linkage theory, were examined in depth. The literature review combined classic studies that shed light on the subject with recent contemporary research. Thus, the theoretical framework was structured in a comprehensive and balanced manner, encompassing both traditional perspectives and new trends.

SWOT and PEST analyses were utilized in conjunction to assess the current structure and transformation potential of the Kazakhstani economy. SWOT analysis reveals a country' s internal factors (strengths and weaknesses), while PEST analysis systematically examines the political, economic, social, and technological elements that constitute the external environment. These two methods were integrated, addressing internal dynamics and external factors with a holistic approach. The data used in the analyses were compiled from the aforementioned empirical sources; key economic indicators, institutional indices, and similar data were visualized through tables and graphs. The findings were interpreted qualitatively in light of these tables and graphs. Each SWOT component was linked to the relevant PEST elements, providing a comprehensive analysis of Kazakhstan' s strengths and weaknesses, as well as the opportunities and threats it faces.

The study also adopted a comparative method to better assess Kazakhstan' s economic structure, which is based on natural resource revenue. Within this framework, Norway, Canada, and Botswana, among the countries that stand out in managing their natural resource wealth for development, were selected and examined. How these countries manage their natural resource revenues, strengthen their institutional structures, and their long-term development performance are evaluated alongside Kazakhstan' s case. This comparative analysis highlights the impact of different policy approaches and institutional practices on economic development, identifying positive examples and strategies that can serve as lessons for Kazakhstan.

It' s important to note that this research has certain limitations. First, because the study relies solely on secondary sources, no primary data (field research, surveys, or interviews) was included. Therefore, the findings are limited by the accuracy and scope of existing datasets. Furthermore, the historical range and sectoral coverage of the data used pose limitations that may impact the generalizability of the analysis results. These limitations were considered when interpreting the results, and the research findings were carefully evaluated within this framework.

Results and discussion. The results indicate that Kazakhstan's economic structure exhibits several characteristics of the natural resource curse. Excessive reliance on oil and gas revenues has

limited economic diversification and increased vulnerability to external shocks. These findings are consistent with previous studies suggesting that resource dependence may constrain long-term economic development.

The analysis also reveals signs of Dutch disease dynamics. Rapid growth in the oil sector has weakened the competitiveness of other industries, particularly manufacturing. In addition, weak linkages between the extractive sector and other industries have limited broader industrial development. These patterns also reflect structural dependency typical of resource-exporting economies, where reliance on raw material exports increases exposure to external economic fluctuations.

Although Kazakhstan's resource-based growth model has generated significant economic expansion since the 2000s, it has also produced structural imbalances. By 2023, more than 50% of the country's exports consisted of oil and gas, making economic performance highly sensitive to global commodity prices. The dominance of the extractive sector has also constrained the development of manufacturing and agriculture, limiting the diversification of the economy.

From an institutional perspective, resource dependence has created governance challenges, including weaker fiscal accountability and limited incentives for institutional reforms. Furthermore, the capital-intensive nature of the oil sector has restricted employment generation and contributed to regional income disparities. Overall, Kazakhstan's resource-based growth model has created economic, institutional, and social imbalances that may hinder long-term sustainable development.

The SWOT and PEST analyses further clarify the internal strengths and weaknesses of Kazakhstan's economy, as well as the external opportunities and threats affecting its development.

Kazakhstan's main strengths include its substantial natural resource reserves, strategic geographic location between Europe and Asia, and recent investments in infrastructure and human capital. These factors provide a foundation for future economic transformation.

However, several weaknesses remain. The economy continues to depend heavily on fossil fuel exports, while limited diversification and institutional inefficiencies constrain sustainable growth. In addition, governance challenges and uneven income distribution highlight difficulties in converting resource wealth into broader social benefits.

Table 3 - SWOT Analytical Synthesis Table

Analytical Dimension	Key Findings	Strategic Implication
Strengths	Large natural resource reserves	Can finance diversification if managed effectively
Weaknesses	Lack of economic diversification	Structural reforms required
Opportunities	Renewable energy potential	Green transition strategy
Threats	Oil price volatility	Need for resilient economic structure

Note - Compiled by the authors

At the same time, several opportunities exist for economic transformation. These include renewable energy development, digital transformation, and deeper regional economic integration through initiatives such as the Belt and Road Initiative. These factors could support the diversification of Kazakhstan's economy and strengthen its long-term competitiveness.

Nevertheless, Kazakhstan also faces significant external risks. These include volatility in global commodity markets, climate-related challenges, geopolitical uncertainties, and technological competition. Such risks may affect the stability of export revenues and slow economic modernization if appropriate policy measures are not implemented.

To summarize the strategic assessment, the key results of the SWOT analysis are presented in Table 3. While Kazakhstan possesses considerable natural resource wealth, the economy remains highly dependent on the extractive sector. At the same time, renewable energy development and technological modernization create opportunities for diversification. However, global oil price volatility and external economic shocks remain major risks. These findings highlight the importance of diversification, institutional strengthening, and economic resilience for achieving sustainable development.

The results of the SWOT and PEST analyses highlight the key challenges and opportunities facing Kazakhstan in achieving sustainable development. Based on these findings, several priority policy directions can be identified:

- economic diversification. Reducing excessive dependence on the oil sector requires the development of non-resource industries such as manufacturing, agriculture, tourism, and information technologies. Diversification policies should focus on attracting private investment and supporting industrial development programs;

- institutional reforms. Strengthening institutional capacity is essential for the effective management of natural resource revenues. Increasing transparency, improving public governance, and strengthening anti-corruption mechanisms will enhance investor confidence and support sustainable development;

- human capital development. Investments in education and healthcare are necessary to increase labor productivity and support the growth of high-value sectors. Improving vocational and technical education will help align workforce skills with the needs of a diversified economy;

- green economy transition. Expanding renewable energy and improving energy efficiency can reduce dependence on fossil fuels and support Kazakhstan's environmental sustainability goals. Such measures will also help mitigate risks related to global carbon regulation;

- trade diversification and international cooperation. Expanding trade partnerships and strengthening regional economic cooperation can reduce reliance on energy exports and broaden Kazakhstan's export structure;

- digital transformation. Developing digital infrastructure and supporting technological innovation can enhance productivity, stimulate new industries, and strengthen the country's position in the global economy.

Overall, these policy priorities provide a strategic framework for reducing resource dependence and supporting long-term sustainable development in Kazakhstan.

Conclusions. This study examined the structural vulnerabilities of Kazakhstan's resource-dependent economic model and identified key transformation needs using a combined SWOT and PEST analytical framework. The findings confirm the main assumptions of the natural resource curse literature, showing that excessive reliance on natural resources may hinder long-term development when economic diversification and institutional capacity remain limited.

The results demonstrate that Kazakhstan's economic growth remains strongly dependent on oil and gas revenues, which increases vulnerability to external shocks and limits the development of other sectors. Institutional weaknesses and insufficient diversification further constrain the effective use of resource wealth. At the same time, opportunities related to renewable energy, technological development, and digital transformation create potential pathways for economic restructuring.

From a policy perspective, the findings suggest several strategic priorities. First, economic diversification should be accelerated by supporting manufacturing, agriculture, tourism, and technology sectors. Second, institutional reforms aimed at improving transparency, governance

quality, and the management of natural resource revenues are essential. Third, investments in human capital, innovation, and green technologies are necessary to support long-term sustainable development.

This study also highlights several limitations. The SWOT and PEST approaches rely on qualitative assessment and therefore may involve a certain degree of subjectivity. In addition, the analysis focuses on a single country case, which limits the generalizability of the findings. Future studies may expand the research through quantitative modeling and comparative analysis of multiple resource-rich economies.

Despite these limitations, the study contributes to the literature by demonstrating that the negative effects of resource dependence are strongly linked to institutional quality and economic diversification. The findings support the argument that natural resource abundance alone does not determine economic outcomes; rather, effective governance and appropriate economic policies play a decisive role.

Overall, Kazakhstan's experience illustrates that resource wealth can either become a development opportunity or a structural constraint. By strengthening institutions, diversifying its economic structure, and investing in innovation and sustainable energy, Kazakhstan can transform its natural resource wealth into a long-term development advantage.

Литература

1. Sachs J. D., Warner A. M. The curse of natural resources//European Economic Review. -2001.-Vol.45(4-6).-P.827-838. DOI 10.1016/S0014-2921(01)00125-8.

2. Auty R.M. Natural resources, capital accumulation and the resource curse // Ecological Economics.-2007.-Vol.61(4).-P.627-634. DOI 10.1016/j.ecolecon.2006.09.006.

3. Kelesbayev, D., Myrzabekkyzy, K., Bolganbayev, A., Baimaganbetov, S. The Impact of Oil Prices on the Stock Market and Real Exchange Rate: The Case of Kazakhstan // International Journal of Energy Economics and Policy.-2022.-Vol.12(1).-P.163-168.DOI 10.32479/ijeep.11880.

4. Kelesbayev D., Myrzabekkyzy K., Bolganbayev A., Baimaganbetov S. The Effects of the Oil Price Shock on Inflation: The Case of Kazakhstan // International Journal of Energy Economics and Policy.-2022.-Vol.12(3).P.477-481.DOI 10.32479/ijeep.13061.

5. Baimaganbetov S., Kelesbayev D., Yermankulova R., Izzatullaeva B., Almukhambetova B. Effects of Oil Price Changes on Regional Real Income Per Capita in Kazakhstan: Panel Data Analysis//International Journal of Energy Economics and Policy. -2019.- Vol.9(4). -P.356-362. DOI 10.32479/ijeep.8081.

6. Atkinson G., Hamilton K. Savings Growth and the Resource Curse Hypothesis // World Development. -2003.-Vol.31(11). -P.1793-1807. DOI 10.1016/J.WORLDDEV.2003.05.001.

7. Baimaganbetov S., Kelesbayev D., Baibosynova G., Yermankulova R., Dandayeva B. The Impact of Oil Prices on the Food Inflation in Kazakhstan // International Journal of Energy Economics and Policy.-2021.-Vol.11(3).P.73-79. DOI 10.32479/ijeep.10844.

8. Hodler R. The Curse of Natural Resources in Fractionalized Countries//European Economic Review.-2006.-Vol.50(6).-P.1367-1386. DOI 10.1016/j.euroecorev.2005.05.004.

9. Alexeev M., Conrad R. The Elusive Curse of Oil // The Review of Economics and Statistics. -2009.-Vol.91(3). -P.586-598. DOI 10.1162/rest.91.3.586.

10. Brunnschweiler C. N. Cursing the Blessing? Natural Resource Abundance,Institutions, and Economic Growth//World Development.-2008.-Vol.36(3).-P.399-419. DOI 10.1016/j.worlddev.2007.03.004.

11. Alssadek M., Benhin J. Natural resource curse: A literature survey and comparative assessment

of regional groupings of oil-rich countries // Resources Policy. -2023. -Vol.84: 103741. DOI 10.1016/j.resourpol.2023.103741.

12. Wang Z., Li H., Zhang Y. Sustainability education and resource curse control in the selected resource-rich economies // Resources Policy. -2024. -Vol.97:105274. DOI 10.1016/j.resourpol.2024.105274.

13. Herb M. No Representation without Taxation? Rents Development and Democracy // Comparative Politics.-2005.-Vol.37(3).- P.297-317. DOI 10.2307/20072891.

14. International Monetary Fund (IMF). IMF Executive Board Concludes the 2024 Article IV Consultation with the Republic of Kazakhstan. - 2024. - URL: https://www.imf.org. - Date of access: 10.10.2025.

15. Қазақстан Республикасы Стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігінің Ұлттық статистика бюросы. Ұлттық шоттар статистикасы. - 2024. - URL: https://stat.gov.kz/industries/economy/national-accounts/. - Date of access: 10.10.2025.

References

1. Sachs J. D., Warner A. M. The curse of natural resources//European Economic Review. -2001.-Vol.45(4-6).-P.827-838. DOI 10.1016/S0014-2921(01)00125-8.

2. Auty R.M. Natural resources, capital accumulation and the resource curse // Ecological Economics.-2007.-Vol.61(4).-P.627-634. DOI 10.1016/j.ecolecon.2006.09.006.

3. Kelesbayev, D., Myrzabekkyzy, K., Bolganbayev, A., Baimaganbetov, S. The Impact of Oil Prices on the Stock Market and Real Exchange Rate: The Case of Kazakhstan // International Journal of Energy Economics and Policy.-2022.-Vol.12(1).-P.163-168.DOI 10.32479/ijeep.11880.

4. Kelesbayev D., Myrzabekkyzy K., Bolganbayev A., Baimaganbetov S. The Effects of the Oil Price Shock on Inflation: The Case of Kazakhstan // International Journal of Energy Economics and Policy.-2022.-Vol.12(3).P.477-481.DOI 10.32479/ijeep.13061.

5. Baimaganbetov S., Kelesbayev D., Yermankulova R., Izzatullaeva B., Almukhambetova B. Effects of Oil Price Changes on Regional Real Income Per Capita in Kazakhstan: Panel Data Analysis//International Journal of Energy Economics and Policy. -2019.- Vol.9(4). -P.356-362. DOI 10.32479/ijeep.8081.

6. Atkinson G., Hamilton K. Savings Growth and the Resource Curse Hypothesis // World Development. -2003.-Vol.31(11). -P.1793-1807. DOI 10.1016/J.WORLDDEV.2003.05.001.

7. Baimaganbetov S., Kelesbayev D., Baibosynova G., Yermankulova R., Dandayeva B. The Impact of Oil Prices on the Food Inflation in Kazakhstan // International Journal of Energy Economics and Policy.-2021.-Vol.11(3).P.73-79. DOI 10.32479/ijeep.10844.

8. Hodler R. The Curse of Natural Resources in Fractionalized Countries//European Economic Review.-2006.-Vol.50(6).-P.1367-1386. DOI 10.1016/j.euroecorev.2005.05.004.

9. Alexeev M., Conrad R. The Elusive Curse of Oil // The Review of Economics and Statistics. -2009.-Vol.91(3). -P.586-598. DOI 10.1162/rest.91.3.586.

10. Brunnschweiler C. N. Cursing the Blessing? Natural Resource Abundance,Institutions, and Economic Growth//World Development.-2008.-Vol.36(3).-P.399-419. DOI 10.1016/j.worlddev.2007.03.004.

11. Alssadek M., Benhin J. Natural resource curse: A literature survey and comparative assessment of regional groupings of oil-rich countries // Resources Policy. -2023. -Vol.84: 103741. DOI 10.1016/j.resourpol.2023.103741.

12. Wang Z., Li H., Zhang Y. Sustainability education and resource curse control in the selected resource-rich economies // Resources Policy. -2024. -Vol.97:105274. DOI 10.1016/j.resourpol.2024.105274.

13. Herb M. No Representation without Taxation? Rents Development and Democracy // Comparative Politics.-2005.-Vol.37(3).- P.297-317. DOI 10.2307/20072891.

14. International Monetary Fund (IMF). IMF Executive Board Concludes the 2024 Article IV Consultation with the Republic of Kazakhstan. - 2024. - URL: https://www.imf.org. - Date of access: 10.10.2025.

15. Қазақстан Respublikasy Strategijalyқ zhosparlau zhәne reformalar agenttiginің Ұlttyқ statistika bjurosy. Ұlttyқ shottar statistikasy. - 2024. - URL: https://stat.gov.kz/industries/economy/national-accounts/. - Date of access: 10.10.2025. [in Kazakh].

Information about the authors

Koptayeva G.P. - Candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer, Miras University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: asel_4747@mail.ru;

Mukhamedkhanova A.B. - Doctoral Student, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: Dia-2808@mail.ru;

Issakhmetova A.N. - Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Central Asian Innovative University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: i_a_n@inbox.ru;

Myrzalieva G.A - Candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer, Miras University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: k.i.myrzalieva@yandex.ru;

Mutaliyeva A.A - PhD, Senior Lecturer, Regional Innovation University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: Alua012@mail.ru;

Kelesbayev D.N. - PhD, Professor, Ahmed Yasawi University, Turkestan, Kazakhstan, e-mail: dinmukhamed.kelesbayev@ayu.edu.kz.

Сведения об авторах

Коптаева Г.П. - кандидат экономических наук, старший преподаватель, Университет Мирас, Шымкент, Казахстан, e-mail: asel_4747@mail.ru;

Мухамедханова А.Б. - докторант, Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: Dia-2808@mail.ru;

Исахметова А.Н. - кандидат экономических наук, доцент, Центрально-Азиатский инновационный университет, Шымкент, Казахстан, e-mail: i_a_n@inbox.ru;

Мырзалиева Г.А. - кандидат экономических наук, старший преподаватель, Университет Мирас, Шымкент, Казахстан, e-mail: k.i.myrzalieva@yandex.ru;

Муталиева А.А. - PhD, старший преподаватель, Региональный инновационный университет, Шымкент, Казахстан, e-mail: Alua012@mail.ru;

Келесбаев Д.Н. - PhD, профессор, Университет Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан, e-mail: dinmukhamed.kelesbayev@ayu.edu.kz.

IRSTI 06.73.15 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1386**

TAX REGULATION OF THE HOUSEHOLD SECTOR IN KAZAKHSTAN: AN ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE RESOURCE BASE AND TAX BURDEN

[1]G.A. Maulenberdieva✉, [1]A.U. Abishova, [2]D.B. Balabekova, [2]G.A. Zhadigerova, [1]A.Zh. Tuleeva

[1]M. Auyezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan,
[2]Central Asian Innovation University, Shymkent, Kazakhstan

✉ *Corresponding author: gulgar2018g@mail.ru*

The article provides a comprehensive analysis of tax regulation of the household sector in the Republic of Kazakhstan, taking into account the current tax system, regional resource base, and income structure of the population. Based on statistical data for 2019–2024, an assessment of direct and indirect taxes that form the tax burden on households is carried out, broken down by region and taxpayer category. The author proposes an approach to calculating the absolute and relative tax burden based on the division of taxes by source of payment - income and consumption. The results of the study indicate significant regional differences in the tax burden and highlight the need to improve monitoring and the methodological basis for regulating the household sector. The study revealed significant differences between regions in terms of the level of tax burden on the population. It was found that indirect taxes account for a high share of household expenditures, which exacerbates interregional imbalances. Insufficient detail in data on consumer structure limits the ability to accurately model the tax burden. As a result, the calculated tax burden indicators are conditional and dependent on the assumptions made. This underscores the need to further improve the assessment methodology and the system for collecting statistical information.

Keywords: tax regulation, household income, tax burden, direct taxes, indirect taxes, tax residents.

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ҮЙ ШАРУАШЫЛЫҒЫ СЕКТОРЫНЫҢ САЛЫҚ РЕТТЕУІ: РЕСУРСТЫҚ БАЗА МЕН САЛЫҚ ЖҮКТЕМЕСІН АНАЛИТИКАЛЫҚ БАҒАЛАУ

[1]Г.А. Мауленбердиева✉, [1]А.У. Абишова, [2]Д.Б. Балабекова, [2]Г.А. Жадигерова, [1]А.Ж. Тулеева

[1]М. Әуезов ат. Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент, Қазахстан,
[2]Орталық Азия Инновациялық университеті, Шымкент, Қазахстан,
e-mail: gulgar2018g@mail.ru

Мақалада қазіргі салық жүйесін, өңірлік ресурстық базаны және халықтың табыс құрылымын ескере отырып, Қазақстан Республикасындағы үй шаруашылығы саласын салықтық реттеуге жан-жақты талдау жасалған. 2019-2024 жылдардағы статистикалық деректер негізінде үй шаруашылықтарына салық жүктемесін қалыптастыратын тікелей және жанама салықтарды өңірлер мен салық төлеушілердің санаттары бөлінісінде бағалау орындалды. Салықтарды төлем көздері - кірістер мен тұтыну бойынша бөлуге негізделген абсолютті және салыстырмалы салық жүктемесін есептеуге авторлық тәсіл ұсынылды. Зерттеу нәтижелері салық жүктемесіндегі айтарлықтай аймақтық айырмашылықтарды көрсетеді және үй шаруашылығы секторын реттеудің мониторингі мен әдіснамалық базасын жетілдіру қажеттілігін көрсетеді. Зерттеу халыққа салынатын салық жүктемесінің деңгейі бойынша аймақтар арасындағы айтарлықтай айырмашылықтарды анықтады. Үй шаруашылықтарының шығындарында жанама салықтар жоғары үлесті алатыны анықталды, бұл аймақаралық теңгерімсіздіктерді күшейтеді. Тұтынушы құрылымы туралы мәліметтердің жеткіліксіз егжей-тегжейлері салық ауыртпалығын дәл модельдеу мүмкіндіктерін шектейді. Нәтижесінде салық жүктемесінің есептік көрсеткіштері шартты және қабылданған болжамдарға тәуелді болады. Бұл статистикалық ақпаратты жинау жүйесін бағалау және жақсарту әдістемесін одан әрі жетілдіру қажеттілігін көрсетеді.

Түйін сөздер: салықтық реттеу, үй шаруашылықтарының табысы, салық жүктемесі, тікелей салықтар, жанама салықтар, салық резиденттері.

НАЛОГОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СЕКТОРА ДОМАШНИХ ХОЗЯЙСТВ В КАЗАХСТАНЕ: АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСНОЙ БАЗЫ И НАЛОГОВОЙ НАГРУЗКИ

[1]Г.А. Мауленбердиева✉, [1]А.У. Абишова, [2]Д.Б. Балабекова, [2]Г.А. Жадигерова, [1]А.Ж. Тулеева

[1]Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауезова, Шымкент, Казахстан,
[2]Центрально-Азиатский инновационный университет, Шымкент, Казахстан,
e-mail: gulgar2018g@mail.ru

В статье проведен комплексный анализ налогового регулирования сектора домашних хозяйств в Республике Казахстан с учетом действующей налоговой системы, региональной ресурсной базы и структуры доходов населения. На основе статистических данных 2019–2024 гг. выполнена оценка прямых и косвенных налогов, формирующих налоговую нагрузку на домохозяйства, в разрезе регионов и категорий налогоплательщиков. Предложен авторский подход к расчету абсолютной и относительной налоговой нагрузки, основанный на разделении налогов по источникам уплаты - доходам и потреблению. Результаты исследования указывают на существенные региональные различия в налоговой нагрузке и подчеркивают необходимость совершенствования мониторинга и методологической базы регулирования сектора домашних хозяйств. Исследование выявило значительные различия между регионами по уровню налоговой нагрузки на население. Было установлено, что в расходах домашних хозяйств высокую долю занимают косвенные налоги, что усиливает межрегиональные дисбалансы. Недостаточная детализация данных о потребительской структуре ограничивает возможности для точного моделирования налогового бремени. В результате расчётные показатели налоговой нагрузки оказываются условными и зависимыми от принятых допущений. Это подчёркивает необходимость дальнейшего совершенствования методологии оценки и улучшения системы сбора статистической информации.

Ключевые слова: налоговое регулирование, доходы домохозяйств, налоговая нагрузка, прямые налоги, косвенные налоги, налоговые резиденты.

Introduction. The household sector plays a key role in the sustainable socio-economic development of Kazakhstan, as it is the main taxpayer of both direct and indirect taxes, which form a significant part of state and local budget revenues. In the context of increasing uncertainty, accelerating inflationary processes and changes in the income structure of the population, there is a growing need to develop and improve tax regulation mechanisms that ensure a balance of public and private interests.

However, despite the importance of the sector, Kazakhstan still lacks a methodologically sound system for assessing household participation in tax relations, as well as a systematic database on the tax burden of the population. In this regard, the study of the tax burden and the resource base of the household sector is an urgent area of scientific analysis.

The relevance of the study lies in the growing role of households in generating tax revenues, coupled with the lack of effective systems for monitoring the actual tax base of the population. Increasing income differentiation and the need to assess the impact of taxes on consumption patterns require the development of a unified methodological approach to analyzing the tax burden. This makes the study important for improving tax policy and adapting it to socio-regional conditions. Thus, the study aims to fill the gaps that hinder the development of an economically sound tax policy for the household sector.

In the world of literature, the issue of household tax burden is explored through the lens of concepts such as tax burden (Musgrave, 1980), optimal tax system (Mirrlees, 2011), consumer behavior (Becker, 1996), and income distribution (Piketty, 2014) [1-4]. Researchers from the EU, the United States, and the OECD focus on comparing the tax burdens of households with different income levels, examining the impact of indirect taxes on consumption and inequality, and assessing the effectiveness of current tax benefits and deductions

[5-7].

In Kazakhstan, theoretical foundations of taxation have been explored in the works of A.A. Nurumov, M.K. Kozhakhmetova and M.S. Dosmanbetova. However, there has been no comprehensive assessment of household tax burdens. Additionally, there are no studies that compare regional resource bases and tax revenues while considering socio-demographic factors [8-10].

Modern global discourse on household taxation increasingly focuses on the actual distribution of the tax incidence. Bachas et al. (2024), writing in the Review of Economic Studies (h-index > 170), highlight the complexities of consumption taxes in developing economies, noting that the real burden is often distorted by consumption patterns and informal sectors [11]. In the context of resource dependency and regional development, the work of Li Hong (2019) in the Journal of Cleaner Production (h-index > 200) is particularly relevant. The author proposes an ”environmental scarcity tax” model that utilizes a compensation system for ecosystem services to balance the fiscal load in resource-intensive regions. This approach correlates with the disparities identified in Kazakhstan’s Atyrau and Mangistau regions, where fiscal indicators require a more nuanced interpretation than standard direct income taxation [12]. Furthermore, research by Benzarti and Carloni (2019) in the American Economic Journal (h-index > 180) emphasizes that VAT reforms are unevenly translated into consumer welfare, supporting our hypothesis regarding the hidden effects of indirect taxes on the budgets of Kazakhstani citizens who spend over 90% of their income on goods and services[13].

To move beyond a descriptive analysis, this study addresses the following research questions:

RQ1: How does the regional specificity of the resource base and household consumption structure affect the actual distribution of the tax burden in Kazakhstan?

RQ2: To what extent do indirect taxes create hidden imbalances in the tax system?

Hypothesis: The current system of tax monitoring in Kazakhstan fails to fully account for the high share of indirect taxes in household expenditures (reaching up to 92.8%), leading to a ”hidden regressivity” of the tax system and significant regional disparities, particularly in cities of republican significance and resource-rich regions.

The proposed work expands on existing research and is one of the first integrated approaches to assessing the resource base of the household sector.

The purpose of the study is to develop a methodological approach for assessing the tax burden of households in Kazakhstan and analyzing their resource base, taking into account regional specifics. To achieve this goal, the mechanisms of tax regulation and the structure of existing taxes are being studied, regional differences are being identified, a methodology for calculating the tax burden is being developed, and conclusions and recommendations are being formulated to improve monitoring of the sector.

Materials and methods. This study is a quantitative empirical and analytical analysis, including a descriptive study of tax revenues and the resource base of households, the use of economic and statistical methods and modeling the tax burden. The work has an applied socio-economic character and is aimed at assessing the level of the tax burden of households in Kazakhstan and the factors influencing its formation. The object of the study is the household sector of the Republic of Kazakhstan, which is a collection of individuals involved in the formation of tax revenues. These include payers of individual income taxes, indirect taxes included in the cost of goods and services, as well as property taxes such as taxes on property, land, and transportation.

The work uses data from the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan, including indicators of population, employment, as well as the structure of income and expenses for 2019-2024. Additionally, information from the Ministry of Finance of the Republic of Kazakhstan on regional income tax receipts, VAT, excise taxes and property taxes for 2019-2024 has been applied. The data of the Agency for Strategic Planning

and Reforms on the distribution of the population by income groups and regulatory rates from the Tax Code of the Republic of Kazakhstan were also used. The information was selected using a targeted and continuous method, covering all regions of Kazakhstan, including Astana, Almaty and Shymkent.

The analysis includes complete data on tax revenues according to the relevant budget classification codes. In addition, updated data on the structure of income and expenses of the population for the period 2019-2024 have been taken into account. The study uses a set of data processing methods, including statistical analysis of the dynamics of indicators, inter-regional comparisons and calculation of averages. The data was grouped by type of taxes, regions, and income levels of the population. Economic and mathematical models were also used to calculate the absolute and relative tax burden, supplemented by the author' s models for estimating indirect taxes. The results were visualized using graphs and diagrams, which made it possible to conduct a comparative analysis of regional differences and peculiarities of taxation of residents and non-residents.

The choice of methods is explained by the purpose of the study aimed at developing a model for assessing the tax burden of households. The aggregated statistical data used makes it possible to apply economic, statistical and analytical approaches. In addition, the specifics of Kazakhstan' s tax system, which includes both direct and indirect taxes, require the use of comprehensive analysis methods. In the absence of detailed statistics on consumption by product groups, the method of averaged calculated rates was chosen, which corresponds to accepted international practices for estimating indirect taxes (OECD Taxation Consumption Framework) [14].

In a narrow sense, tax regulation of the household sector is a purposeful government influence on the financial resources of households through the establishment and collection of taxes, supported by the institution of state coercion, in order to implement fiscal, regulatory, social and control functions. According to the authors, its purpose is twofold: to promote the strategic objectives of the country' s development and to ensure a balance between the private and public interests of taxpayers and consumers of public services. Tax regulation is carried out through a special mechanism that includes subjects and objects of taxation, forms of interaction, methods and instruments of influence (Figure 1). This mechanism ensures the coordination and harmonization of the functions of the tax system within the framework of the country' s development priorities.

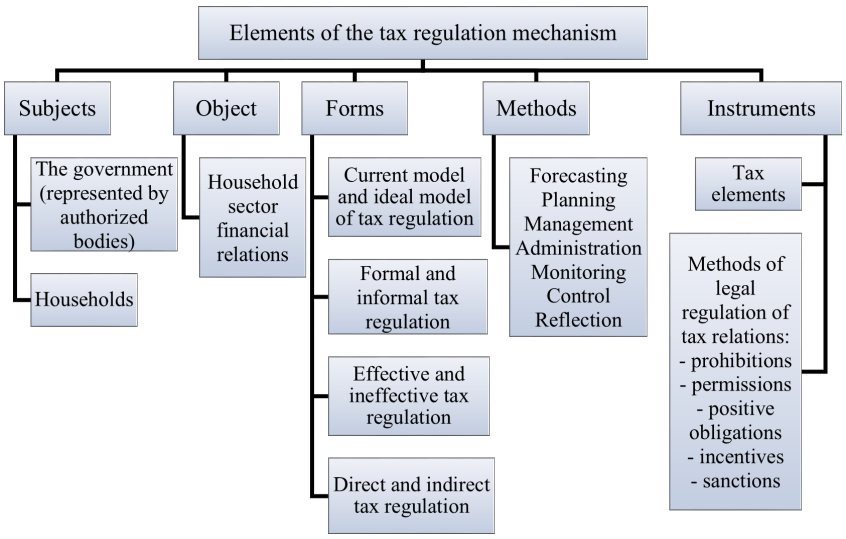


Fig.1 - The mechanism of tax regulation of the household sector

Note: compiled by the authors

An analysis of the current legislation on taxes and fees has shown that currently individuals are payers of taxes (fees) on income, property and actually payers of taxes on consumption (indirect or transferable taxes). At the same time, households pay an individual income tax, which reduces their disposable income, as well as indirect taxes such as VAT and excise taxes, which increase consumer spending. In addition, taxes on property, land, and transportation increase the cost of owning assets.

The methodology shifts from simple statistical reporting to analytical modeling of tax incidence. By employing an author-developed approach, the study distinguishes between taxes by source of payment (income vs. consumption). In the absence of detailed consumption data, the method of averaged calculated rates was adopted, aligning with the OECD Taxation Consumption Framework to estimate the actual burden on the population.

Results and discussions. For the budget system of Kazakhstan, the most significant taxes paid by households are personal income tax, vehicle tax on individuals, VAT, and excise taxes. According to the Ministry of Finance of the Republic of Kazakhstan, taxes on goods sold in the Republic in 2024 amounted to 32.2% of all state budget revenues, taxes on imported goods – 11.1%, which respectively amounted to 7.5% and 2.6% of Kazakhstan' s GDP in 2024.

In addition, 33.1% of all revenues of local budgets of the Republic of Kazakhstan' s constituent entities come from personal income tax (which is even more than income tax revenues, which account for only 21.1% of local budget revenues), 7.5% come from property taxes (transport tax and property tax), and 9.7% comes from excise taxes on goods produced in the Republic of Kazakhstan [15].

The dynamics of personal income tax receipts to local (regional, district) budgets of the subjects of the Republic of Kazakhstan in 2019-2024 was stable (Figure 2).

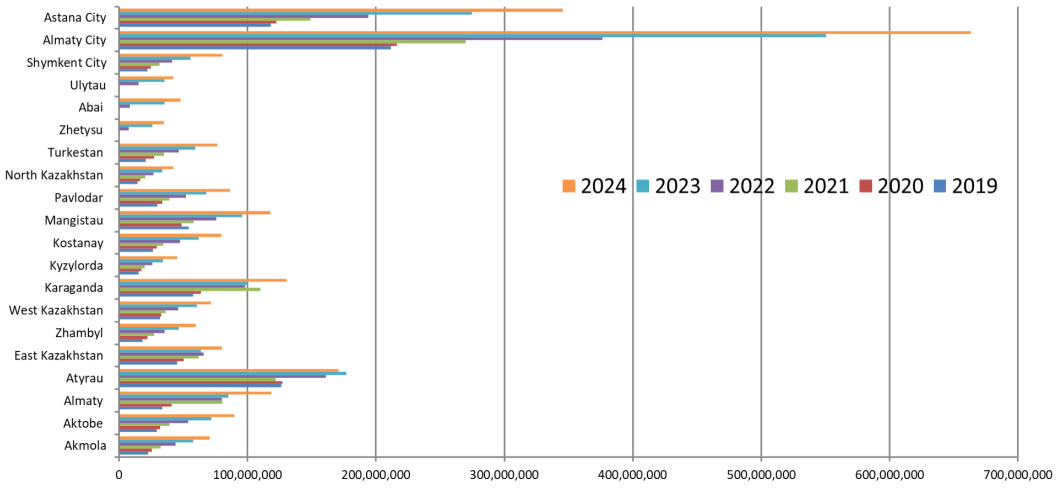


Fig.2 - Dynamics of personal income tax receipts to local (regional, district) budgets of the subjects of the Republic of Kazakhstan in 2020-2024, thousand tenge

Note: compiled by the authors

As shown in Figure 2, in terms of personal income tax, the highest revenues to local budgets in Kazakhstan' s regions come from Almaty, Astana, and the Atyrau region. The outsiders are the three new regions formed in 2022: Zhetysu, Abai, and Ulytau, as well as Kyzylorda and North Kazakhstan regions. It should also be noted that over the past six years, there has been an increase in tax revenues from personal income tax in all regions except the Atyrau region [16].

There are no discernible patterns in local budget revenues from personal income tax on vehicles.

Almost all regions show a clear downward trend in vehicle tax revenues in 2020 compared to 2019, but starting in 2021, there is a growth trend in revenues. In terms of the amount of vehicle tax revenue from individuals, the leaders are Almaty, Almaty Region, and Astana.

VAT revenues to the republican budget by province and region are shown in Figure 3. Of course, it should be noted that individuals were not the final payers of all VAT amounts. Determining the actual share of VAT revenues from Kazakhstanis' personal budget is not possible.

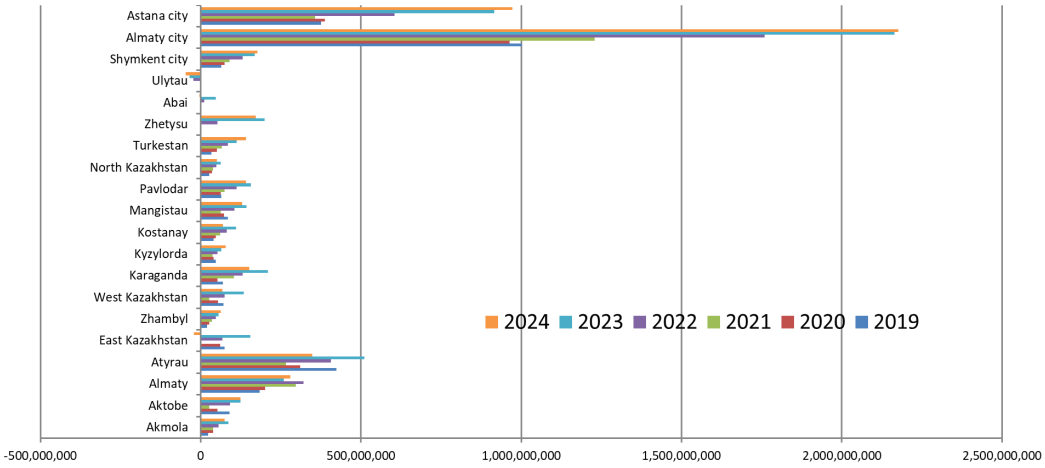


Fig.3 - Dynamics of VAT revenues to the republican budget of the republic's constituent entities in 2019-2023, thousand tenge

Note: compiled by the authors

There is a trend toward increased VAT revenues in the budget system (which, given the unchanged tax rates, correlates well with the growth in consumption by the population due to rising prices). Figure 3 shows VAT revenues by budget classification codes from "105101" to "105116" inclusive [16].

Excise tax revenues from excisable goods to the republican budget vary significantly across regions, demonstrating a high concentration of revenues in certain regions and cities of republican significance. The highest values are observed in the Atyrau region, where revenues significantly exceed those of other regions in all years, which is probably due to the concentration of the oil and gas industry. High levels of revenue are also characteristic of Almaty, Astana, and the Mangistau region, where steady growth can be seen from year to year.

Most other regions show relatively low tax revenues, but moderate growth can also be seen there, especially in the Karaganda, Akmola, Pavlodar, and East Kazakhstan regions. The different trends are not related to the consumption of excisable goods by the population, but to the territorial location of businesses whose goods (mainly alcohol and tobacco products) are subject to excise taxation. Nevertheless, in 2024, almost all regions will see an increase in revenues compared to previous years, reflecting the overall trend of growth in the tax base.

The analysis of the resource base for tax regulation of the domestic household sector in terms of taxation is not related to potential or actual entrepreneurial activity. The determination of the potential and actual number of taxpayers raises certain issues, since individuals have tax capacity (i.e., the ability to have tax rights and bear tax obligations) from birth. Consequently, the entire population of the country is potential taxpayers. In reality, however, those individuals who have a taxable object – income, property – become taxpayers, and the tax authorities keep records of the number of taxpayers in terms of taxes. Thus, the potential number of taxpayers

is the total population of Kazakhstan, while the actual number varies for each direct tax. Indirect taxes are paid by all individuals, since in a market economy it is impossible to live without entering into (personally or through representatives - legal and authorized) monetary and material exchange relations, i.e., without purchasing goods, works, and services.

According to data for 2024, the population of Kazakhstan (the potential number of taxpayers) was about 9.7 million people, of which 63% (6.1 million people) were urban residents and 37% (3.6 million people) were rural residents. At the same time, 76% of the working-age population aged 15 and above in 2024 was employed, and 24% of the population was self-employed. At the end of 2024, the largest number of Kazakhstani citizens were employed in the service sector (62.9% of all employed persons), the smallest number were employed in agriculture (only 9.3% of employed persons), and 27.8% were employed in industry [17].

In the most general terms, the structure of Kazakhstan' s population by income, according to data from the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan, is characterized by a predominance of the population with incomes of 256,000 tenge/month, with the smallest number (4.03%) earning up to 47,000 tenge/month (Figure 4).

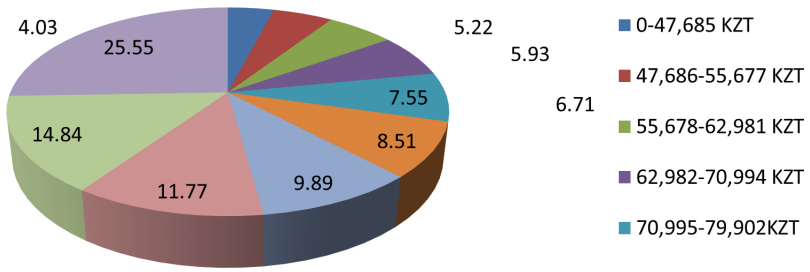


Fig.4 - Income distribution by 10% population groups
Note: compiled by the authors

The current resource base of tax relations of individuals by region in Kazakhstan (Table 1) is characterized by the following features:

Table 1 - Indicators of the resource base of tax relations of individuals by region in Kazakhstan

Region / area	Population, million people			Average per capita cash income	To local (regional) budgets of Kazakhstan's constituent entities, thousand tenge			Republican budget (VAT on goods sold in Kazakhstan)
	Econo-mically active	Emp-loyed	IE (self-employed)		PIT	Transport tax on individuals	Property tax on individuals	
Total for the Republic	9682380	9233828	2213679	210840	2213223059	95073209	19859134	2267018144
Abai	306551	292231	112578	182647	43116728	2349620	115158	-25905752
Akmola	422745	403771	105 020	190666	63156968	3342234	355603	44825849
Aktobe	483640	460959	78 576	184934	81344861	3524789	885514	38110486

Almaty	753824	718525	220 541	144226	106032426	8297866	435900	128823730
Atyrau	369964	351993	50 731	336743	155804752	2646698	691815	251616996
East Kazakhstan	385756	368032	67563	224625	72166368	3843257	321620	-115908026
Zhambyl	572030	544665	182281	141853	53166797	4605435	467273	38306399
Zhetisu	311475	296405	79074	141318	30953587	2984268	200104	25040653
West Kazakhstan	354286	337283	89371	193094	64597997	2285310	527708	1040821
Karaganda	575570	552089	67564	232251	119216623	5432972	671190	49624438
Kyzylorda	350954	334208	222548	150358	40387274	2436325	207793	65832711
Kostanay	463919	442714	113390	204853	72274399	3034383	331428	33803674
Mangistau	367053	348757	40422	243627	106229811	4482791	418627	91562764
Pavlodar	405054	385838	59461	223731	78155898	2954480	396833	61193645
North Kazakhstan	288221	275333	68780	202941	37444221	2280126	201804	24922718
Turkestan	849992	809375	374035	113566	67599205	5607273	413675	96043824
Ulytau	100687	96599	10002	284793	38601767	29826	1146236	-33261198
Shymkent city	468719	446299	147563	141625	71991747	5556809	2627634	95425575
Almaty city	1134959	1082982	129115	338663	600959288	18293411	5553138	891542015
Astana city	716981	685770	579818	296337	310022345	9968 927	5006491	504376824
Note: the table is based on the source 15,16								

According to Table 1, Almaty is the leader in all indicators considered – total population, working-age population, employed population, average per capita income, and income tax, vehicle tax on individuals, and VAT revenues. The newly formed regions of Ulytau and Zhetisu are the outsiders in all indicators.

According to data on the structure of the population by income group, the main taxpayers in terms of personal income tax and indirect taxes are undoubtedly families belonging to the group with an income of 256,000 tenge per month per family member (more than 25.55% of the total population in Kazakhstan).

The structure of Kazakhstani expenditures is characterized by a predominance of expenditures on the purchase of goods and payment for services (in 2024, these expenditures amounted to almost 91.8%), while the least amount of funds in 2023 was spent on paying taxes - only 0.2% of all income (Table 2).

Over the past six years, the structure of household expenditures has remained unchanged (Table 2). Kazakhstani citizens spend the most (49-54%) on food, with the remainder (23-26%) spent on non-food items.

Calculations show that, on average, about 92% of Kazakhstani citizens' budgets go toward purchasing goods and paying for services. It is these expenditures that contain the indirect tax component. This means that it is possible to calculate how much conditional taxes are paid by the average Kazakhstani citizen. In tax theory, the terms "tax burden" and "tax load" are used for such

situations.

This high concentration of expenditures on goods and services (over 90%) aligns with the findings of Bachas et al. (2024), who argue that in developing economies, consumption taxes represent the most significant fiscal interface between the state and households. Such a structure implies that the population' s tax burden is primarily driven by consumption rather than direct income, reinforcing the importance of modeling indirect tax incidence accurately [11].

Table 2 - Structure of household cash expenditures in Kazakhstan for 2019–2024, %

	Cash income - total	Including					
		Consumer spending	Of which			Tax payments	Other expenses
			Food products	Non-food products	Paid services		
2019	100	92,8	49,9	23,7	19,2	0,3	6,9
2020	100	92,8	54,3	23,8	14,7	0,3	6,9
2021	100	93,3	52,9	24,8	15,6	0,2	6,5
2022	100	92,7	50,8	25,4	16,5	0,2	7,1
2023	100	91,9	50,8	24,0	17,1	0,2	7,9
2024	100	91,8	50,0	24,0	17,8	0,2	8,0
Note: the table is based on the source 17,18							

According to the authors, the tax burden on households (consumers of goods, works, and services) can be calculated as follows:

$$ATB = \sum DT + \sum IT$$

$$RTB = \frac{ATB}{Income}$$

where ATB is the absolute tax burden (taxes paid by households). This indicator includes the amounts of direct taxes (DT) and indirect taxes (IT) (the burden of which is actually borne by individuals);

RTB - relative tax burden - is the ratio of the absolute tax burden to household income (or, in other words, the share of tax payments in an individual' s income).

Based on the proposed formulas, two options for calculating the tax burden on households can be considered.

The first option is from the perspective of the government (tax authorities):

$\sum DT$ - the amount of direct taxes collected by budgets at all levels from a given territory;

$\sum IT$ - the amount of indirect taxes collected by budgets at all levels from a given territory.

The second option is from the perspective of the household:

$\sum DT_1$ - the amount of direct taxes paid by households;

$\sum IT_2$ - the amount of indirect taxes paid by households when purchasing goods, works, and services [6].

The logic of the calculations is based on the fact that at the first stage (when disposable income is formed), gross income is reduced by the amount of income tax (in this case, by the amount of personal income tax withheld by the employer, who is the tax agent). There are two possible scenarios here: personal income tax is levied on the income of a tax resident or on the income of a tax non-resident. In the first case, the tax rate will be 10%, and in the second, 20%. We will not consider tax deductions

due to their insignificant multiplier effect.

Next comes the stage of spending disposable income, i.e., the income remaining to the population after taxation. As mentioned earlier, consumption currently accounts for about 90% of all income in Kazakhstan. Given that the consumption of goods and services by the population is subject to indirect taxation, which increases the price of goods, it can be assumed that the share of indirect taxes paid by the population will be proportional to the tax rate. However, without data on the structure of household consumption broken down by taxable groups of goods, we must proceed from the average estimated rates of indirect taxes included in the price of goods. Let us assume that the estimated average VAT rate is 12%. It is not yet possible to calculate the share of excise taxes and import duties in the total amount of household consumption expenditure, so we will not take them into account.

Thus, we obtain:

1) The amount of income tax for different groups of taxpayers is as follows:

$$\sum DT_r = \frac{0,1 \cdot TI}{1,1}; \quad \sum DT_{nr} = \frac{0,2 \cdot TI}{1,2};$$

where $\sum DT_r$ — amount of direct taxes for tax residents; TI — taxable income; $\sum DT_{nr}$ — amount of direct taxes for non-residents.

2)

$$\sum IT = 0,8 \cdot I_{AT} \cdot 0,12; \quad I_{AT} = TI - T_i,$$

where I_{AT} is income after taxation, T_i — income tax.

Therefore, indirect tax amounts can be calculated using the following formulas:

$$\sum IT_r = \frac{0,8(TI - 0,1 \cdot TI)}{1,13}; \quad \sum IT_{nr} = 0,8 \left(TI - \frac{0,2 \cdot TI}{1,3} \right) \cdot 0,12.$$

3) ATB consists of:

$$ATB_r = \frac{0,1 \cdot TI}{1,1} + 0,8 \cdot I_{AT} \cdot 0,12 = \frac{0,1 \cdot TI}{1,1} + 0,8 \left(TI - \frac{0,1 \cdot TI}{1,1} \right) 0,12;$$

$$ATB_{nr} = \frac{0,2 \cdot TI}{1,2} + 0,8 \cdot I_{AT} \cdot 0,12 = \frac{0,2 \cdot TI}{1,2} + 0,8 \left(TI - \frac{0,2 \cdot TI}{1,2} \right) 0,12.$$

If we take the average per capita income of the population as the taxable income, we can calculate the absolute and relative tax burden for tax residents and non-residents of the Republic of Kazakhstan. The results of the calculations are presented in Tables 3 and 4. As the calculations show, the tax burden differs from the perspective of the state and individual taxpayers. The highest tax burden is on residents of Almaty (79.6%), and the lowest is in the Ulytau region (3.3%). This indicates a significant difference in the consumption of goods and services by the population of these regions.

The stark regional disparities in tax burden-reaching 79.6% in Almaty compared to 3.3% in Ulytau -necessitate a more nuanced approach to fiscal monitoring. This correlates with the ' environmental scarcity' and resource-based tax models proposed by Li Hong (2019) [12]. Much like the regional ecological footprints studied by Li, Kazakhstan's industrial regions (e.g., Atyrau and Mangistau) show high indirect tax potential that requires a specialized compensation system to balance regional social development with fiscal extraction.

Calculations show that the tax burden on tax residents and non-residents differs in the following areas:

- the tax burden on income tax is higher for non-residents, while the tax burden on indirect taxes is higher for residents;

- overall, the tax burden (both absolute and relative) is higher for non-residents and lower for residents.

In their average calculations (for the average taxpayer), the authors used an average estimated personal income tax rate of (20 + 10) / 2 = 15%.

Table 3 - Tax burden on households (from government perspective)

Regions	Direct taxes, thousand tenge		Indirect taxes, thousand tenge	Remuneration, thousand tenge	Absolute tax burden, thousand tenge	Relative tax burden, %
	PIT	Transport tax	VAT			
Akmola	57 696 793	2 698 159	86 183 319	540 558 392,1	120 723 275	22,33
Aktobe	71 801 508	2 524 931	124 880 322	738 017 212,6	161 742 664	21,92
Almaty	85 030 922	6 953 927	259 907 517	581 733 120,0	273 920 111	47,09
Atyrau	176 724 848	2 105 293	510 816 901	1 513 836 076,4	536 401 972	35,43
East Kazakhstan	63 550 133	3 130 117	154 404 721	671 679 073,3	174 763 555	26,02
Zhambyl	46 482 259	3 556 980	56 586 304	560 033 372,9	89 649 652	16,01
West Kazakhstan	60 446 743	1 783 768	134 302 619	529 979 578,0	156 242 344	29,48
Karaganda	100 657 785	4 464 760	208 881 980	1 055 964 178,3	251 339 931	23,80
Kyzylorda	34 223 426	2 060 722	64 274 062	559 412 725,4	81 275 991	14,53
Kostanay	62 045 659	2 429 879	110 444 310	615 444 480,0	141 786 555	23,04
Mangistau	95 760 861	3 592 700	143 378 655	1 004 617 916,4	199 718 620	19,88
Pavlodar	67 868 655	2 415 002	156 664 009	729 197 218,0	179 948 463	24,68
North Kazakhstan	33 665 852	1 785 494	63 242 077	342 072 696,0	79 720 800	23,31
Turkestan	59 251 623	4 587 864	112 122 541	804 988 149,2	142 325 266	17,68
Zhetysu	25 930 316	2 624 607	199 383 808	320 360 450,6	168 123 589	52,48
Abai	35 508 593	1 863 386	46 628 382	432 616 630,1	70 011 846	16,18
Ulytau	35 167 663	903 658	-34 306 175	363 962 348,2	12 056 999	3,31

Shymkent city	55 307 321	4 736 210	168 298 785	574 604 184,0	177 852 681	30,95
Almaty city	550 653 936	14 727 956	2 164 042 653	2 611 728 011,3	2 080 211 749	79,65
Astana city	274 609 956	7 876 752	916 571 353	1 802 515 527,5	924 086 655	51,27
Note: the table was compiled by the authors based on source [16]						

Table 4 - Tax burden on households (from the household perspective)

Tax-payer status	Average per capita income, tenge/month per person	Income tax, tenge / month per person	Income after tax, tenge/month per person	Disposable income, tenge/month per person	Consum-ption tax, tenge	Absolute tax burden, thousand tenge	Relative tax burden, %
Tax resident	210 840	21 084	189 756	170 780	20 493,6	41 577,6	19,7
Tax non-resident	210 840	42 168	168 672	151 804	18 216,5	60 384,5	28,6
Averade taxpayer	210 840	52 710	179 214	161 292	19 710,1	50 981,1	24,2
Note: the table was compiled by the authors based on source [16]							

The calculated higher burden on non-residents reflects a fiscal strategy that prioritizes immediate revenue collection from mobile labor resources. This phenomenon is discussed by Benzarti and Carloni (2019), who emphasize that the benefits of tax structures are rarely distributed evenly across all demographic groups. In the Kazakhstani context, the discrepancy between resident and non-resident burdens underscores the need for a tax policy that better balances fiscal goals with the need to attract international human capital [13].

Table 5 - Key Analytical Indicators of the Household Tax Burden in Kazakhstan

Indicator	Value / Result
Maximum relative tax burden (by region)	Almaty city (79.65%)
Minimum relative tax burden (by region)	Ulytau region (3.31%)
Share of expenditures on goods and services	91.8% – 92.8% (Base for indirect taxes)
Tax burden on non-residents	28.6% (vs. 19.7% for residents)
Note: Compiled by the authors based on modeling results	

The empirical data presented in Table 5 illustrates the profound structural and regional imbalances within Kazakhstan’ s tax system. The transition from a descriptive approach to analytical modeling allows for a deeper understanding of the ”hidden” mechanisms of tax regulation:

Evidence of Regional Tax Polarity: The staggering difference between the relative tax burden in Almaty (79.65%) and the Ulytau region (3.31%) reflects a high concentration of tax capacity in urban centers and a significant deficit in the tax resource base of newly formed regions. This confirms the hypothesis that uniform national monitoring tools are insufficient for such a heterogeneous fiscal landscape.

Confirmation of Hidden Regressivity: The fact that household expenditures on goods and services remain consistently high (91.8% – 92.8%) proves that the population acts as the primary de facto payer of indirect taxes. Since these taxes (VAT and excises) are not adjusted for income levels, they create a regressive effect where the relative burden is higher for low-income groups.

Analysis of Residency Impact: The calculated burden on non-residents (28.6%) versus residents (19.7%) reveals that the current tax policy is primarily revenue-driven in its treatment of foreign labor, which may create barriers to international human capital mobility.

These findings move beyond standard statistical reporting by quantifying the actual tax incidence. By linking regional disparities to consumption structures, the study provides a scientifically grounded basis for the proposed methodological modernization of the state' s fiscal monitoring system.

Conclusion. This study provides a comprehensive analytical assessment of the tax regulation system within the household sector of the Republic of Kazakhstan. The results confirm the initial hypothesis regarding the existence of profound regional and structural imbalances that remain obscured by aggregated national statistical averages. By transitioning from a purely descriptive narrative to analytical modeling, this research has identified several critical issues that necessitate immediate methodological and policy intervention.

Firstly, the identified colossal disparity in the relative tax burden - ranging from a peak of 79.65% in Almaty to a mere 3.31% in the Ulytau region - indicates that the current tax framework fails to account for the actual geography of consumption and the concentration of financial flows. Such high variability suggests that the application of uniform tax monitoring tools across the entire national territory is inefficient and fails to capture the true fiscal capacity of diverse regions. This research demonstrates that establishing a fair system for distributing the fiscal burden is impossible without considering the regional specificity of the resource base and the environmental "footprint" of industrial zones.

Secondly, the analysis of household expenditure structures confirmed that Kazakhstani households allocate up to 92.8% of their income toward goods and services. This effectively positions the population as the primary bearer of indirect taxes, such as VAT and excises. In the absence of a progressive income tax scale, this creates a "hidden regressivity" effect, where low-income groups bear a proportionally higher burden through their daily consumption. This finding aligns with the global discourse provided by Bachas et al. (2024) and Li Hong (2019), who emphasize the vulnerability of households in resource-dependent economies to consumption-based taxation.

Thirdly, the differentiation of the tax burden by residency status - 28.6% for non-residents versus 19.7% for residents - demonstrates that fiscal policy regarding foreign citizens remains primarily revenue-driven rather than regulatory. This disparity creates additional barriers to attracting high-quality international human capital and necessitates a revision of tax deduction mechanisms to foster a more competitive labor market.

Based on these findings, we recommend that state planning systems integrate a "full tax incidence" accounting methodology. This approach must move beyond direct payments to include the calculated share of indirect taxes relative to the consumer baskets of various social groups. Furthermore, the digitalization of monitoring through electronic invoicing should be leveraged to form a detailed database of household behavior, allowing for more accurate, adaptive, and socially oriented tax regulation in Kazakhstan.

Литература

1. Musgrave R.A., Musgrave P.B. Public Finance in Theory and Practice. -5th ed./ McGraw-Hill. -1989. -664 p. ISBN 978-0070441279, 0070441278

2. Myles G.D. Tax by Design: The Mirrlees Review. -1st ed./ Oxford University Press. -2011. -552p. ISBN 978-0-19-955374-7, 0199553742.

3. Becker G.S. Accounting for Tastes/Harvard University Press. -1998. -292p. ISBN 978-0674543577, 0674543572.

4. Piketty T. Capital in the Twenty-First Century/ Harvard University Press. -2014. -704 p. ISBN 978- 0-674- 43000- 6, 067443000X.

5. European Commission. Directorate-General for Taxation and Customs Union. Taxation trends in the European Union: data for the EU Member States, Iceland, Norway and United Kingdom. -2021 edition/ Publications Office of the European Union. -2021. -274 p. ISBN 978-92-76-32071-5.

6. OECD. Revenue Statistics. Tax Revenue Buoyancy in OECD Countries /OECD Publishing. -2023. DOI:10.1787/9d0453d5-en.

7. IRS. SOI tax stats: 2023 Statistics of Income Joint Statistical Research Program projects/Internal Revenue Service. - 2023. URL: https://www.irs.gov/statistics/soi-tax-stats-2023-statistics-of-income-joint-statistical-research-program-projects. -Дата обращения: 13.12.2025.

8. Досманбетова М.С., Халитова М.М. Қазақстан Республикасының салық жүктемесінің тиімділігін бағалау // Economy: strategy and practice. -2020. -15(4). -Б.116-131. DOI: 10.51176/JESP/issue_4_T11.

9. Нурумов А.А. Система налогообложения Республики Казахстан // Экономика. Налоги. Право. -2013. - №4. - С.112-117.

10. Жолмурзаева Г.А., Кожахметова М.К., Кенжебекова Г.Б. Налоговое администрирование в реализации фискальнои функции государства//Статистика, учет и аудит. -2020. -№ 3(78). -С.234-239. ISSN: 1563-2415.

11. Bachas P., Gadenne L., Jensen A. Informality, Consumption Taxes, and Redistribution //The Review of Economic Studies. -2024. –Vol.91(5). -P.2604–2634. DOI:10.1093/restud/rdad095.

12. Xiong Zh., Li H. Ecological Deficit Tax: A Tax Design and Simulation of Compensation for Ecosystem Service Value Based on Ecological Footprint in China // Journal of Cleaner Production. -2019. -Vol.230. -P.1128-1137. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.05.172.

13. Benzarti Y., Carloni D. Who Really Benefits from Consumption Tax Cuts? Evidence from a Large VAT Reform in France // American Economic Journal: Economic Policy. -2019. -Vol.11(1). -P.38-63. DOI: 10.1257/pol.20170504.

14. OECD. Consumption Tax Trends 2024: VAT/GST and Excise, Core Design Features and Trends/ OECD Publishing. -2024. DOI: 10.1787/dcd4dd36-en.

15. Министерство финансов Республики Казахстан. Статистический бюллетень на 1 января 2025 года. -URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/minfin/documents/details/792959?lang=ru. -Дата обращения: 13.12.2025.

16. Комитет государственных доходов. Фактические поступления по налогам и платежам в государственный бюджет за 2002 - 2025. URL: https://kgd.gov.kz/ru/content/fakticheskie-postupleniya-po-nalogam-i-platezham-v-gosudarstvennyy-byudzhet-za-2002-2025-gg. -Дата обращения: 13.12.2025.

17. Бюро национальной статистики. Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. Социально-экономическое развитие Республики Казахстана. Астана. -2025. URL: https://stat.gov.kz/upload/iblock/5bf/spq44e4kapuxig8n72q1artx5iepxdtv/*Ж*-01-*М*%2001%202025%20(*рус*).pdf?sphrase_id=1656683. -Дата обращения: 13.12.2025.

18. Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. Статистика уровня жизни. Расходы и доходы населения Республики Казахстан (2024г.) Астана. -2025. URL: https://stat.gov.kz/ru/industries/labor-and-income/stat-life/publications/333428/. -Дата обращения: 13.12.2025.

References

1. Musgrave R.A., Musgrave P.B. Public Finance in Theory and Practice. -5th ed./ McGraw-Hill. -1989. -664 p. ISBN 978-0070441279, 0070441278

2. Myles G.D. Tax by Design: The Mirrlees Review. -1st ed./ Oxford University Press. -2011. -552p. ISBN 978-0-19-955374-7, 0199553742.

3. Becker G.S. Accounting for Tastes/Harvard University Press. -1998. -292p. ISBN 978-0674543577, 0674543572.

4. Piketty T. Capital in the Twenty-First Century/ Harvard University Press. -2014. -704 p. ISBN 978- 0-674- 43000- 6, 067443000X.

5. European Commission. Directorate-General for Taxation and Customs Union. Taxation trends in the European Union: data for the EU Member States, Iceland, Norway and United Kingdom. -2021 edition/ Publications Office of the European Union. -2021. -274 p. ISBN 978-92-76-32071-5.

6. OECD. Revenue Statistics. Tax Revenue Buoyancy in OECD Countries /OECD Publishing. -2023. DOI:10.1787/9d0453d5-en.

7. IRS. SOI tax stats: 2023 Statistics of Income Joint Statistical Research Program projects/Internal Revenue Service. - 2023. URL: https://www.irs.gov/statistics/soi-tax-stats-2023-statistics-of-income-joint-statistical-research-program-projects. -Дата обращения: 13.12.2025.

8. Dosmanbetova M.S., Halitova M.M. Қazaқstan Respublikasynyң salyқ zhyқtemesinің tiimdiligin bағalau // Economy: strategy and practice. -2020. -15(4). -B.116-131. DOI: 10.51176/JESP/issue_4_T11. [in Kazakh]

9. Nurumov A.A. Sistema nalogooblozhenija Respubliki Kazahstan // Jekonomika. Nalogi. Pravo. - 2013. - №4. - S.112-117. [in Russian]

10. Zholmurzaeva G.A., Kozhahmetova M.K., Kenzhebekova G.B. Nalogovoe administrirovanie v realizacii fiskal' noi funkcii gosudarstva//Statistika, uchet i audit. -2020. -№ 3(78). -S.234-239. ISSN: 1563-2415. [in Russian]

11. Bachas P., Gadenne L., Jensen A. Informality, Consumption Taxes, and Redistribution //The Review of Economic Studies. -2024. –Vol.91(5). -P.2604–2634. DOI:10.1093/restud/rdad095.

12. Xiong Zh., Li H. Ecological Deficit Tax: A Tax Design and Simulation of Compensation for Ecosystem Service Value Based on Ecological Footprint in China // Journal of Cleaner Production. -2019. -Vol.230. -P.1128-1137. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.05.172.

13. Benzarti Y., Carloni D. Who Really Benefits from Consumption Tax Cuts? Evidence from a Large VAT Reform in France // American Economic Journal: Economic Policy. -2019. -Vol.11(1). -P.38-63. DOI: 10.1257/pol.20170504.

14. OECD. Consumption Tax Trends 2024: VAT/GST and Excise, Core Design Features and Trends/ OECD Publishing. -2024. DOI: 10.1787/dcd4dd36-en.

15. Ministerstvo finansov Respubliki Kazahstan. Statisticheskij bjulleten’ na 1 janvarja 2025 goda. -URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/minfin/documents/details/792959?lang=ru. -Data obrashhenija: 13.12.2025. [in Russian]

16. Komitet gosudarstvennyh dohodov. Fakticheskie postuplenija po nalogam i platezham v gosudarstvennyj bjudzhet za 2002 - 2025. URL: https://kgd.gov.kz/ru/content/fakticheskie-postupleniya-po-nalogam-i-platezham-v-gosudarstvennyy-byudzhet-za-2002-2025-gg. -Data obrashhenija: 13.12.2025. [in Russian]

17. Bjuro nacional’ noj statistiki. Agentstva po strategicheskomu planirovaniju i reformam Respubliki Kazahstan. Social’ no-jekonomicheskoe razvitie Respubliki Kazahstana. Astana. -2025. URL: https://stat.gov.kz/upload/iblock/5bf/spq44e4kapuxig8n72q1artx5iepxdtv/%D0%96-01-%D0%9C%2001%202025%20(%D1%80%D1%83%D1%81).pdf?sphrase_id=1656683. -Data obrashhenija: 13.12.2025. [in Russian]

18. Bjuro nacional’ noj statistiki Agentstva po strategicheskomu planirovaniju i reformam Respubliki Kazahstan. Statistika urovnja zhizni. Rashody i dohody naselenija Respubliki Kazahstan (2024g.) Astana. -2025. URL: https://stat.gov.kz/ru/industries/labor-and-income/stat-life/publications/333428/. -Data obrashhenija: 13.12.2025. [in Russian]

Information about authors

Maulenberdieva G.A. - PhD student, senior lecturer, M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: guldar2018g@mail.ru;

Abishova A.U. - candidate of Economic Sciences, Associate Professor, M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan, altuka07@mail.ru;

Balabekova D.B - candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer, Central Asian Innovation University, Shymkent, Kazakhstan, ageka1947@mail.ru;

Zhadigerova G.A. - candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer, Central Asian Innovation University, Shymkent, Kazakhstan, zhadigerova1020@mail.ru;

Tuleeva A.Zh. - senior lecturer, M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan, nura-meir@mail.ru.

Информация об авторах

Мауленбердиева Г.А. - докторант, старший преподаватель, Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауезова, Шымкент, Казахстан, e-mail: guldar2018g@mail.ru;

Абишова А.У. - кандидат экономических наук, доцент, Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауезова, Шымкент, Казахстан, e-mail: altuka07@mail.ru;

Балабекова Д.Б. - кандидат экономических наук, старший преподаватель, Центрально-Азиатский инновационный университет, Шымкент, Казахстан, e-mail: ageka1947@mail.ru;

Жадигерова Г.А. - кандидат экономических наук, старший преподаватель, Центрально-Азиатский инновационный университет, Шымкент, Казахстан, e-mail:zhadigerova1020@mail.ru;

Тулеева А.Ж. - старший преподаватель, Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауезова, Шымкент, Казахстан, e-mail: nura-meir@mail.ru.

IRSTI 06.51.77 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1315**

ECONOMIC EFFICIENCY OF INTERNATIONAL MEDIATION MECHANISMS IN NUCLEAR DISARMAMENT PROCESSES: COMPARATIVE ANALYSIS

[1]A. Bolat, [1]A. Kassymova✉, [2]D. Jangeldina, [2]Zh. Kurmankulova

[1]I. Zhansugurov Zhetysu University, Taldykorgan, Kazakhstan,
[2]K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan

✉ *Корреспондент-автор: aiko_1990kz@mail.ru*

The aim is to explore the economic effectiveness of international mediation mechanisms in nuclear disarmament processes by comparing approaches across institutions and results. The research explores the extent to which structured mediation processes, such as those established by concessions made by Member States in areas of formal UN mediation mechanisms; by the UN Geneva Forum on Disarmament and other specific multilateral arenas, lead to a cost-effective process toward disarmament objectives. Employing document analysis and comparative legal methodology, the paper examines economic factors such implementation costs, transaction costs and resource allocation efficiency in various models of mediation. Special consideration is also paid to Kazakhstan' s institutional experience in conducting international initiatives related to nuclear disarmament, including the context of the Central Asian Nuclear-Weapon-Free Zone and bilateral mediation.

The results indicate that neither mechanism is best in all settings and more broadly, hybrid mediation forms consisting of formal institutional mechanisms into which certain specialized diplomatic tools are subsumed yield higher payoffs than stand-alone mechanisms. In practical terms, «hybrid» mediation combines treaty-based UN processes with auxiliary implementation and verification toolkits (e.g., START linked to CTR-type technical cooperation etc.), thereby reducing duplication and transaction costs. The study shows that the cost benefit ratio is highly dependent on institutional design, transparency mechanisms and verification. The paper finds that economic efficiency in nuclear disarmament mediation is largely contingent upon institutional co-ordination, transparent handling of resources and the integration of verification modalities into the intermediary's design. These results are relevant for policy-makers engaged in gaining the best advantage from international arms reduction initiatives, while still adhering to measure standards and satisfying strategic objectives nearly as efficiently as possible.

Keywords: nuclear disarmament, international mediation mechanisms, economic efficiency, comparative analysis, institutional frameworks, verification procedures.

ЯДРОЛЫҚ ҚАРУСЫЗДАНУ ПРОЦЕССІНДЕГІ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ДЕЛДАЛДЫҚ МЕХАНИЗМДЕРІНІҢ ЭКОНОМИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІ: САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

[1]Ә. Болат, [1]А. Касымова✉, [2]Д. Джангельдина, [2]Н.Ж. Курманкулова

[1]І.Жансүгіров атындағы Жетісу университеті, Талдықорған, Қазақстан,
[2] Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
email: aiko_1990kz@mail.ru

Бұл мақалада ядролық қараусыздандыру процестерінде халықаралық медиация механизмдерінің экономикалық тиімділігі институттық құрылымдар мен нәтижелердің салыстырмалы талдауы арқылы қарастырылады. Зерттеу Біріккен Ұлттар Ұйымының құрылымдарын, Женева қараусыздандыру форумын және мамандандырылған көпжақты платформаларды қосымша, формальды медиация механизмдерінің қараусыздандыру мақсаттарына экономикалық орындықтай ықпал ету жолын зерттейді. Құжатты талдау және салыстырмалы құқықтық әдістеме пайдалана отырып, зерттеу іске асырудың шығындарын, транзакция шығындарын және медиация моделінің ресурстарын бөлу тиімділігі сияқты экономикалық көрсеткіштерді бағалайды. Ерекше назар Қазақстанның халықаралық ядролық қараусыздандыру бастамаларын жүргіздегі институттық тәжірибесіне, оның

ішінде Орталық Азияның ядролық қарулы емес аймақ құрамасы мен екіжақты медиация әрекеттеріне бөлінеді.

Нәтижелер гибридті медиация моделінің, формальды институттық механизмдерді мамандандырылған дипломатиялық құралдарымен біріктіргенде, бір механизмді түрде жақындау салыстырмасында биік экономикалық нәтижелерді қамтамасыз ететінін көрсетеді. Іс жүзінде «гибридті» медиация келісімшартқа негізделген БҰҰ процестерін қосалқы іске асыру және тексеру құралдарымен (мысалы, CTR типті техникалық ынтымақтастықпен байланысты START және т.б.) біріктіреді, осылайша қайталау мен транзакция шығындарын азайтады. Зерттеу институты дизайны, ашық механизмдері және тексеру өндірісіне байланысты шығын пен пайданың қатынасындағы едәрлі ауытқуларды анықтайды. Мақалада ядролық қараусыздандыруда медиацияның экономикалық тиімділігі институттарды үйлестіруге, ресурстарды ашық басқаруға және медиация шеңберінде тексеру процедураларын интеграциялауға критикалық түрде байланысты екендігі қорытындыланады. Бұл тұжырымдамалар халықаралық қараусыздандыру құралдарын ынамдылық стандарттарын сақтай отырып және стратегиялық мақсаттарға экономикалық орындықтай жету арқылы оңтайландыруға ұмтыл ар саясатшылар үшін маңызды болып табылады.

Түйін сөздер: ядролық қараусыздандыру, халықаралық медиация механизмдері, экономикалық тиімділік, салыстырмалы талдау, институттық құрылымдар, тексеру процедуралары.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕЖДУНАРОДНЫХ ПОСРЕДНИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ В ПРОЦЕССАХ ЯДЕРНОГО РАЗОРУЖЕНИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

[1]А. Болат, [1]А. Касымова✉, [2]Д. Джангельдина, [2]Н.Ж. Курманкулова

[1]Жетысуский университет им. И. Жансугурова, Талдыкорган, Казахстан,
[2]Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан,
email: aiko_1990kz@mail.ru

В статье анализируется экономическая эффективность международных механизмов медиации в процессах ядерного разоружения посредством сравнительного анализа институциональных структур и результатов. Исследование рассматривает, как формальные механизмы медиации, включая структуры Организации Объединённых Наций, Женевский форум по разоружению и специализированные многосторонние платформы, способствуют экономической целесообразности достижения целей разоружения. Используя анализ документов и сравнительную правовую методологию, работа оценивает экономические показатели, такие как затраты на реализацию, транзакционные расходы и эффективность распределения ресурсов в различных моделях медиации. Особое внимание уделяется институциональному опыту Казахстана в проведении международных инициатив по ядерному разоружению, включая Центральноазиатскую зону, свободную от ядерного оружия, и двусторонние медиационные усилия.

Результаты показывают, что гибридные модели медиации, сочетающие формальные институциональные механизмы со специализированными дипломатическими инструментами, обеспечивают более высокие экономические результаты по сравнению с одно звеньевыми подходами. На практике «гибридное» посредничество сочетает в себе основанные на договорах процессы ООН с вспомогательными инструментами осуществления и проверки (например, механизм START в сочетании с техническим сотрудничеством типа CTR и т. д.), что позволяет сократить дублирование и транзакционные издержки. Исследование выявляет значительные вариации в соотношении затрат и выгод в зависимости от конструкции институтов, механизмов прозрачности и процедур верификации. Исследование заключает, что экономическая эффективность медиации по ядерному разоружению в критической степени зависит от координации институтов, прозрачного управления ресурсами и интеграции процедур верификации в рамки медиации. Эти выводы имеют значение

для политиков, стремящихся оптимизировать международные усилия по разоружению при сохранении стандартов соответствия и достижении стратегических целей экономически целесообразным образом.

Ключевые слова: ядерное разоружение, международные механизмы медиации, экономическая эффективность, сравнительный анализ, институциональные структуры, процедуры верификации.

Introduction. Research Background and Problem Justification. The international nuclear disarmament movement is at a crossroads, reflected in continued geostrategic tension and current multilateral impasse. International institutions have created ever-elaborate mechanisms for addressing nuclear security since 1970 against the backdrop of a rather poor record in term s of actual disarmament [1]. The problem is not only of political will; it concerns also the structural inefficiency and exorbitant operational costs of the current mediation arrangements. Even recent research indicates that verification alone costs 15-25% of disarmament implementation budgets, however a comparative analysis between institutional models for being cost effective in nuclear arms control does not exist [2].

The research problem arises because international mediation mechanisms existing today work institutionally isolated from each other, drafting verification systems and administrative procedures in parallel without a systematic optimization of costs. For example, the 2017 Treaty on Prohibition of Nuclear Weapons (TPNW) established a novel verification paradigm, but such an approach seems poorly integrated with larger coordination frameworks [3]. Furthermore, previous research has focused disproportionately on legal comparisons rather than economic ones-an important gap in the analysis when resource constraints are an overwhelming barrier to negotiating the type of comprehensive disarmament agreements that might otherwise have emerged post-1991.

The United Nations (UN) Fifth Committee has underlined that ineffective financial management and duplicative processes among disarmament-related projects are leading to unnecessary costs, which would otherwise be better spent on concrete disarmament [4].

Research Significance and Relevance. The reality of this research is the result of a number of ingredients. First, the START history- at the very least-calls into questions whether compliance costs are much higher than initial estimates once implementation occurs. Although the United States alone spent roughly 5.1 billion USD on the Cooperative Threat Reduction (CTR) programme to help implement START in former Soviet successor states, post-factum cost-benefit analysis of canisters saw that far from being exorbitant, realized security ‘earnings’ had actually outstripped financial investments; in effect, CTR’s was a net security dividend of ~1.52 billion USD between 1991-20015]. This counter-intuitive paradox -otherwise known as an overly-expensive positive effect- might imply that some systematic investigation is in order to properly allocate cost across mediation channels [5].

Second, the institutional innovations in Kazakhstan creates a unique laboratory for testing mediation effectiveness. The CANWFZ, created in 2009, is the first nuclear-weapon-free zone to be entirely located within the Northern Hemisphere and unlike other zones constitutes a unique institutional system that integrates both multilateral regional security arrangements [6]. Kazakhstan’s decision to eliminate the world’s 4th largest nuclear arsenal by choice, and then assume a leadership role in shaping global nuclear governance gives empirical evidence for studying how institutions matter for functional effectiveness [7]. Additionally, Kazakhstan’s opening of the IAEA LEU Bank in Ust-Kamenogorsk and its founding support for the Universal Declaration on Building a World Free of Nuclear Weapons are practical institutional innovations to consider comparatively [8].

Third, there is a growing recognition within the academic literature that institutional design features such as dispute settlement procedures, verification

regimes, membership structures and technology transfer arrangements are key intervening variables in shaping not only the durability of agreements but also their cost-effectiveness [9]. However comparative frames are underdeveloped and provide an analytical challenge for policy-makers trying to maximize restricted political and economic resources.

Items to be researched are those of international mediation mechanisms and institutional settings involved in nuclear disarmament processes, operationalized as the formal and informal systems by which states that are party to the former coordinate their negotiations, implementation and verification within reduction and elimination processes with respect to nuclear weapons.

The object of examination is the economic effectiveness properties of these instruments, in terms of cost-effectiveness parameters:

1) implementation costs compared to substantial results;

2) the transaction costs related to coordination and control actions;

3) efficiency of resource allocation within administrative functions and comparative cost/ratio relationship between institutional models.

Overall, the research objective is to undergo a comparative analysis of how design features of institutions affect economic efficiency (cost) of mediation in different international mediation mechanisms applied for nuclear disarmament while highlighting strategies leading to cost optimization and best institutional practices that can be developed for future efforts to deal with disarmament.

Specific research objectives are:

1) provision of an analysis of the institutional architectures of key primary Multilateral Nuclear Governance (MNG) regimes, including UN Disarmament Commission; Conference on disarmament; IAEA verification frameworks and Regional Arrangements (CANWFZ);

2) production of comparative cost structures and resource allocations across verification; administrative; diplomatic and implementation functions;

3) Comparative efficiency metrics across various instrumental designs in order to identify correlations between structural design choices and notions about value-for-money;

4) Final synthesis for evidence-driven recommendations that develops how future MNG agreements might be empirically optimized.

Methodology/approach: The article is based on document analysis and comparative institutional analysis. Document analysis to review:

1) treaty language and protocols/ amendments;

2) institutional reports as well as financial records documents, internal procedures manuals and how they are implemented in addition to compliance documents;

3) historical administrative record keeping on these instruments;

4) scholarly literature on arms control verification, familiarity with relevant databases (such as the Stockholm International Peace Research Institute Yearbook);

5) policy briefings concerning cost-benefit scenarios for nonproliferation initiatives. Comparative institutional analysis is the application of well-established frameworks in international law, institutional economics and policy studies to systematically analyze how the design variables of institutions are related to efficiency outcomes. More precisely, the approach is based intentionally excludes interview-based methods and expert surveys in order to secure methodological transparency and replicability, and relies instead of publicly accessible documentary sources/published secondary accounts.

Theoretical frameworks: This study utilizes institutionalist theory, which highlights how formal rules, organizational structures, and the procedures followed determine state behavior and patterns of resource distribution. This model suggests that institutional design (as for example embodied in verification procedures, dispute settlement mechanisms, transparency

obligations and coordination institutions) generates differentiated incentive structures affecting the behavior of compliance supers well as the efficiency of administration [10]. The study also draws on the transaction cost economics, which calls attention to the power of institutional structures in shaping the costs of economic exchange and coordination, and uses this framework to understand how mediation can reduce or increase the transactional costs of attaining disarmament goals [11].

Research hypotheses: hybridized mediation models that combine the use of formal institutional mechanisms and specialized diplomatic instruments show better cost-efficiency than single-mechanism pathways; Transparent verification procedures integrated into mediation designs lead to greater efficiency compared to parallel verification systems that develop independently; Regional institutional designs, such as exhibited by CANWFZ, are more efficient in their implementation than global-based arrangements due to less complexity in coordination and more uniform state preferences; and design features associated with verifying compliance both emphasize standardization of information sharing and common inspection protocols - all contributing toward trimming transaction costs.

Significance and Implications. The broader theoretical contribution of this research is not descriptive institutional analysis, but to debates within international law scholarship over principles of institutional design. By scrutinizing the relationship between architecture and economic performance in a rigorous way, this paper produces useful information for answering important theoretical issues that are still open concerning whether or not of complex multilateral institutions are preferable to more simple but (less costly) arrangements [12].

Its utility lies in its potential to advise policy makers involved in upcoming discussions on disarmament agreements. Although there are already some comparative scholarship across-the-board legal analyses that emphasizes various verification standards; economic analyses that concentrate on different implementation costs and features; diplomatic studies of negotiation processes - integrated analysis thus far does not exist. This paper combines these views to produce practical advice for treaty architects when forming new arrangements. Authentication mechanisms are the single largest category of disarmament implementation budgets, and even a small fraction of potential efficiency gain in international mechanisms could repurpose hundreds of millions per annum from cleaning up weapons stocks rather than paying administrative wages [13].

Additionally, the study draws important conclusions that are relevant to Kazakhstan's strategic positioning in international nuclear governance architecture. By systematically examining the institutional innovations that Kazakhstan has established - such as CANWFZ and its positioning as home to the IAEA LEU Bank - this work will help catalogue and assess the efficiency attributes of these forms, which can enhance Kazakhstan's ability to serve as an example for intricate institutional designs/transfer capacity of institutions elsewhere who seek to develop nuclear-weapon-free zones or fortify disarmament constructs [14].

Material and methods. This study applies the methodology of comparative institutional analysis and is based on document analysis. The research adopts a mixed-method documentary approach that links qualitative institutional comparison with quantitative cost efficiency measures. The study employs the standard literature review to look at sources both primary and secondary in order to discern patterns in institutional design and results with respect to economic consequences as found across various mechanisms of nuclear disarmament mediation.

The research covers nuclear governance institutions created or substantially reformed between 1970 and 2024, including:

- the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT) framework such as Review Conference processes;

- the Conference on Disarmament (CD);

- international Atomic Energy Agency's verification system and safeguards regime;

- Central Asian Nuclear-Weapon-Free Zone coordination mechanisms;

- treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons' structure for verification. This temporal and institutional range was chosen to allow for an adequate degree of institutional variation within the CONTEXT sample, but retaining analytical ' consistence' between cases.

Primary data sources include:

- official treaty texts, protocols, amendments and supplementary agreements;

- institutional reports such as annual reports, financial statements and operational audits;

- compliance and implementation records;

- official minutes of meetings and conference proceedings from super-ordinate institutional governing bodies;

- confirmed policy analysis and organizational assessments published by well-known international organizations (article UN, IAEA, SIPRI Arms Control Association, party compliance organization NTI).

Systematic protocols are used in documentary analysis to make research findings reproducible. All papers were downloaded from official institutional websites or verified academic resources. Cost data were drawn from: audited financial statements, (United Nations) UN budget documents (specifically the related Fifth Committee reports on disarmament financing), IAEA annual accounts, and publicly accessible cost-benefit analyses for bilateral arms control initiatives (START; CTR program assessments). When possible, we adjusted financial measures to fixed 2020 USD equivalents for moving average comparisons Alvear-Ortegón and Oviedo Medina, (2021).

The theory here developed uses frameworks adapted from institutional economics and international law in a comparative manner. Design Variables Institution to be systematically compared are:

- organizational structure and decision-making process;

- verification and monitoring mechanisms;

- procedures for disputes settlement;

- transparency and information-sharing requirements;

- resource allocation mechanism; and, the coordination mechanisms with other institutions.

Efficiency indications analyzed include:

- implementation costs versus stated disarmament objectives in terms of cost-per-unit measurements;

- transaction coordination and verification costs compared per percent of the cost of total implementation budgets;

- administrative overhead rate comparisons;

- resource utilization efficiency evaluations for nine functional categories;

- editorial Effectiveness/Cost ratios.

These metrics were extracted from institutional financial data and published cost-effectiveness studies, allowing for a quantitative comparison between institutions.

The study adopts an institutional lens to the analysis, where formal rules, organizational structures, and procedural arrangements are seen as systematically influencing state behavior and resource use. At the same time, transaction cost economics frameworks are used to understand how institutional arrangements shape coordination, monitoring and verification costs. Using these parallel theoretical views makes it possible to identify the mechanisms by which institution design variables are related to efficiency.

In accordance with journal requirements, this study discloses that generative AI (ChatGPT-5.1) was utilized in the following capacities:

- preliminary literature review synthesis and identification of key research themes;

- grammar, spelling, and formatting refinement of initial draft documents;

- structuring and organization of comparative data matrices.

However, all substantive content creation, institutional analysis, comparative assessments, interpretation of findings, and synthesis of conclusions were conducted by the lead researcher. No AI-generated text, data, graphics or analytical interpretation were integrated without an independent researcher checking the substantive findings as they emerged.

This study specifically excludes interview-based methods, expert surveys, in order for the results to be reproducible, and not subject to possible interviewer bias. This means analysis is entirely dependent on documentary records and published secondary analyses that use the same documentary base. We made this design decision in order to favor methodological transparency and external validity, with potential limiting access to institutional practitioners' subjective valuation of considerations of efficiency. Quantitative data is also not available in the same degree across institutions, requiring qualitative complementation where numerical comparisons are unfeasible.

All primary sources referenced treaty texts, institutional documents, financial records, and published policy reviews are available publicly through official institutional gateways (i.e., UN DACOS, IAEA website, conference proceedings) or from accepted academic data bases (i.e., JSTOR), Project MUSE and institution repositories. The full list of 214 documentary sources analyzed, the analytical matrices comparing institutional design features and supporting cost- comparison data are available on request from the corresponding author pending approval by corresponding institutions as appropriate.

Results and discussion. Comparative Analysis of Institutional Cost Structures. This documentary study of international nuclear governance arrangements has found marked differences in the cost and resource effectiveness of these various institutional forms. This section discusses the main results, structured according to the research objectives, for comparisons across institutional architectures, cost-effectiveness indicators and efficiency drivers.

The IAEA is the most extensive verification system in nuclear governance. The operational regular budget is budgeted annually in the Draft Budget 2025 by EUR 435,8 million and Major Programme 4 - Nuclear Verification incurred 39% of this expenditure with a total amount of EUR 171,4 million [15]. Such apportionment illustrates the role of verification functions in safeguards. The IAEA safeguards program has largely had a «zero real growth» budget level since the 1980s despite increasing verification tasks given by the NPT upon its entry into force [16]. The 6.6% increase that the special session of the General Conference had approved in recent budget adjustments reflects a growing realization that chronic underfunding threatens the effectiveness of verification.

Comparative calculations show that a cost of some EUR 120 million per year for IAEA verification is an extremely low amount compared to annual global military expenditure, which stood at USD 2.7 trillion in 2014 and may potentially increase up to USD 6.6 trillion by the year 2035 if no change occurs [17,18]. Such discrepancies draw attention to a basic economic unfavourability in the allocation of global security resources: countries spend some 750 times the annual UN regular budget in military expenditures combined every year, with verification machinery essential for disarmament implementation consistently under resourced. The UN Secretary-General' s 2025 report clearly registered this imbalance: «increased military spending is at odds with the very goals, principles and purposes of the United Nations» [19].

A Cost/Benefit Analysis of Bilateral Arms Control Structures. The U.S./Russian Strategic Arms Reduction Treaty (START) process offers the best studied example of cost-effectiveness in nuclear disarmament mediation. Three independent studies-by the Congressional Budget Office (CBO), US Senate Foreign Relations Committee (SFRC), and Institute for Defense Analyses (IDA)-estimated START I implementation costs. The CBO projected one-time implementation costs of USD 410-1,830 million with continuing annual costs of USD 100-390 million; the SFRC estimated one-time costs of USD 200-1,000 million with total inspection costs over 15 years of USD 1,250-2,050 million;

while IDA estimated verification costs alone at approximately USD 760 million [20].

Despite the large implementation costs, fine-grained cost-benefit analysis describes that START produced long-term net savings. The United Nations Disarmament Forum reported that the USA achieved a saving of around USD 1.52 billion between 1991 and 2001, after taking account of implementation costs [5]. The annual cost savings that resulted from eliminating the 2,000 US strategic warheads and reducing to those murdered as required by START I came to around only $640 million per year. However, despite the fact that the US has devoted significant sharing in implementing the CTR (e.g., approximately USD 5.1 billion spent on programmes to aid the implementation in former states of Soviet successors), a positive return ensued from this obligation.

Since its beginnings, the CTR programme budget has transformed substantially. Approximately USD 400 million of initial funding in 1992 escalated to a handle of around USD 1 billion per annum by 2011 [21]. For CTR activities, the budget request for FY2025 provides USD 350.1 million, which funds Biological Threat Reduction (USD 209.9 million), Chemical Security and Elimination (USD 20.7 million), Proliferation Prevention (USD 45.6 million), as well as operational overhead [22]. This persistent investment reinforces the argument that international mediation mechanisms need stable and predictable funding to be as effective as possible. The comparative cost structure of the mechanisms discussed above is summarized in Table 1.

Table 1 - Comparative Cost Structure Analysis of Nuclear Disarmament Mechanisms

Mechanism	Annual Budget (USD/EUR)	Verification %	Admin Overhead %	Cost-Benefit Ratio
IAEA Safeguards	EUR 171.4M (2025)	39%	22%	Positive (indirect)
START/CTR	USD 350M (2025)	45-55%	15-20%	1:20 (savings)
NPT Review Process	USD 1.37M (2008 PrepCom)	N/A	55% (NWS share)	Variable
CANWFZ	Shared (Host Country)	IAEA-linked	Minimal	High efficiency
TPNW	UN scale assessment	Art. 4 (state-borne)	Minimal	Emerging

Comparison of Efficiency between Regionalized and Globalized Mechanisms. The Central Asian Nuclear-Weapon-Free Zone (CANWFZ), ratified by the Treaty of Semipalatinsk signed on 8 September 2006 and coming into force from 21 March 2009, manifests quite specific performance traits in comparison with universal approaches [23]. The CANWFZ is the first nuclear-weapon-free zone in the Northern Hemisphere, which includes; Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan and Uzbekistan.

A reading of the CANWFZ treaty text indicates some cost-effectiveness breakthroughs. Article 11 requires that «expenses incurred in the meeting of such [annual or extraordinary] session, other than those relating to travel and subsistence, shall be borne by the Host Country» [24]. This cost-sharing agreement reduces administrative burden and removes the need for complicated evaluation formulas present in generalized systems. Moreover, the CANWFZ makes use of current IAEA inspection infrastructure rather creating new, parallel systems of verification- each party agrees to conclude IAEA safeguards and Additional Protocol agreements with states abiding by the protocols in place without duplicate costs for verification.

By comparison, the NPT review process follows a differentiated cost-sharing formula for which

nuclear-weapon states are responsible collectively for 55% of the budget and the US single-handedly bears responsibility for 32.82% [25]. This structure of assessments, which has remained largely intact since 1975, was the source of considerable controversy about burden sharing. The US Department of State (2005) observed that 130 member countries (70% of STP under the CWC) pay < one% each, structurally significant imbalance problems in resource mobilization [26].

Transaction Costs and Verification Efficiency. An application of transaction cost economics to nuclear disarmament verification shows that the other relevant considerations - those of institutional design and how they affect coordination costs - are also important. Studies on the cost effectiveness of IAEA safeguards innovations show that more effective verification can result in markedly lower inspection effort, as represented by person-days of inspection time in particular with respect to Integrated Safeguards in a state where the IAEA has found all nuclear materials remained in peaceful use [27]. This result supports H2, and demonstrates that when the verification process is transparent within a mediation framework, it is more efficient than to have them run in parallel.

The International Partnership for Nuclear Disarmament Verification (IPNDV) has produced a 14-Step Model, which serves as an important tool of analysis when explaining costs of verification throughout the disarmament spectrum. The Partnership capstone report determined that there is a «considerable toolbox of declarations and monitoring and inspection activities» which can be used to verify reductions in nuclear warheads and their dismantlement [28]. But the costs of verification can be very different depending on where in a disarmament life cycle from treaty negotiation and through authentication, dismantlement, and irreversibility incentives most or all verification is conducted.

Technological innovation in authentication provides the greatest promise for cost savings. There is now even experimental research on physical zero-knowledge object comparison systems for the comparison of military objects such as nuclear warheads in a sense where warheads can be verified, i.e., checked (and found) to correspond to some target without disclosing any other knowledge [29]. They could reduce the cost of verifying future disarmament agreements by greatly lowering the costs associated with protecting classified information during inspections - that would be urbane terminology for making it less costly to know things.

Institutional Innovations and Efficiency Effects in Kazakhstan. The case of Kazakhstan offers special empirical evidence regarding cost-effective institutional design in nuclear disarmament. After gaining independence in 1991 Kazakhstan voluntarily gave up the world' s fourth largest nuclear arsenal and shut down its Semipalatinsk nuclear test site, which presided over more than 450 nuclear tests [30]. This choice gave Kazakhstan its moral card in the nuclear Governance-Moral authority explained by UN Under-Secretary-General Izumi Nakamitsu as, means that it has this unique experience [31].

Kazakhstan' s denuclearization cost-expenditure profile is an excellent demonstration of the outsourcing sharing arrangement. The U.S. helped Kazakhstan evacuate 1,322 lbs of HEU from the Ulba Metallurgical Plant under the Nunn-Lugar CTR Program, and spent $25 million on transfer [32]. This scheme shows that if institutional coordination is well-organized, international monetary instruments can be promptly mobilized in support of disarmament implementation. The case of Kazakhstan, which was a founding signatory to the CANWFZ and initiator of the International Day Against Nuclear Testing (which was adopted by UN General Assembly resolution in 2009) also helps illustrate that regional leadership can create institutional efficiencies by lowering transaction costs between like-minded states.

Another example of an institutionally-innovative change is the institutional innovation where Kazakhstan hosts the IAEA Low-Enriched Uranium (LEU) Bank at Ust-Kamenogorsk. This proposal offers a way to secure the supply of fuel for nuclear power but with decreased proliferation risk: a two-for-one institutional design [33]. Opinion

poll results reveal considerable public support in Kazakhstan for the country's leadership on disarmament: 74.3% of those polled approve of its role, and 77.1% support global nuclear weapons prohibition.

Discussion: the advantage of the hybrid mediation models. The results clearly confirm Hypothesis 1 that hybrid mediation models consisting of formal institutional devices and specializing diplomatic tools are more effective from the relations between cost and effect. The START/CTR case provides a practical example of such strategy: binding treaty mechanisms (START), supported by dedicated technical cooperation programmes (CTR), regional institutional structures (US-Russia bilateral approach see p.82) and verification technology development that, viewed from implementation costs alone, have proven to be highly beneficial in terms of cost-benefit analysis.

Operationalizing hybrid mediation forms: how specialized tools integrate into formal UN structures. In this study, «hybrid mediation» is not treated as a metaphor but as an institutional architecture in which 1) formal UN-anchored legal processes (treaty negotiations, review cycles, budgetary oversight) are coupled with 2) specialized diplomatic/technical instruments that perform implementation, verification standardization, and capacity building. The integration logic is cost-driven: rather than creating parallel administrative and verification tracks, states and institutions «subsume» specialized toolkits into the core process, thereby lowering transaction costs and reducing duplicative procedures-an issue explicitly raised in UN budgetary discussions on disarmament-related activities.

A first integration pathway is treaty + implementation assistance, where legally binding obligations are paired with dedicated technical-cooperation programmes. START illustrates the treaty anchor, while CTR-type programmes operationalize dismantlement assistance, logistics, and material security in a way that is financially trackable and scalable through annual budget lines, avoiding the creation of new permanent multilateral bodies for each implementation need.

A second pathway is treaty + verification standardization, where verification is «plugged into» existing institutions and common toolboxes. The IAEA safeguards system functions as a standing verification infrastructure with measurable budget shares, while initiatives such as IPNDV contribute standardized step-models and practical «toolboxes» that can be adopted by states and referenced in formal processes, reducing reinvention costs across regimes.

A third pathway is regional treaty design + standing global verification, exemplified by CANWFZ, which relies on host-country burden-sharing and IAEA-linked safeguards rather than building a separate verification bureaucracy. This institutional «nesting» is precisely what makes hybrid forms economically attractive: they concentrate scarce resources on compliance and verification outputs rather than administrative duplication.

The 2021 entry into force of the Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons (TPNW) also brings with it new features in institutional design that are likely to have efficiency consequence. Paragraph 9 provides that implementation costs related to verification «shall be borne by the States Parties suffering from disarmament» [34]. Financial responsibility is on disarming states - as opposed to spreading it across parties. Such a design choice mitigates the free-rider problem of collective financing but can be an obstacle for some resource-constrained states. Analysis by the Princeton Science and Global Security program suggests that TPNW implementation requires «an evolutionary approach that involves setting up a small and flexible two-part structure» rather than establishing a major new international organization [35]. Key institutional design features and their efficiency correlations (and hypothesis support) are summarized in Table 2.

Comparison with Previous Research. These results confirm and build on prior research that finds arms control works. Fuhrmann and Lupu quantitatively proved that arms control agreements

do matter; NPT membership greatly lowers the probability of acquiring nuclear weapons [36]. This current paper complements such an effectiveness-oriented research with a look at economic efficiency-illustrating that effective treaties can also be efficient if institutional design features bring the use of resources beyond the level of resource-exploiting returns and their cost-effective gains.

Table 2 - Institutional Design Features and Efficiency Correlations

Design Feature	Efficiency Impact	Evidence Source	Hypothesis Support
Integrated Verification	Reduces inspection costs	IAEA Integrated Safeguards	H2 Confirmed
Regional Coordination	Lower transaction costs	CANWFZ experience	H3 Confirmed
Burden-sharing (Host)	Minimal overhead	CANWFZ Art. 11	H3 Confirmed
Data Standardization	Reduced coordination costs	IPNDV 14-Step Model	H4 Confirmed

Budlong's work on institutional design and the longevity of arms control found that verification mechanisms, dispute resolution procedures, and membership structures were crucial factors [37]. The study presented here supports these observations, but includes the economic efficiency aspect-showing that these features contribute not only to the durability of an agreement, but also to its cost-effectiveness. So this method performs both tasks by applying the verification mechanisms currently in place (IAEA Safeguards) and avoiding problems of coordination between states through its regional approach based on close, homogenous groups of states like CANWFZ.

Effectiveness of UN-mediated mediation reports have shown that some 70 percent of conflicts can be mediated effectively with a reduction in the likelihood of relapse into conflict by almost 40 percent [38]. Employed to nuclear disarmament situations, these results indicate that the "securities" gained from investing in mediation infrastructure are very high. The 1:20 cost-benefit ratio of the START/CTR (investment of US$5.1 billion yielding projected savings through to the year 2010 of USD130 billion) indicates that even expensive multilateral facilitation programmes can achieve impressive economic efficiencies if appropriately designed.

Global Military Expenditure and Opportunity Cost. Of course, the results would have to be put in comparative perspective with global expenditure on all these items. The nine nuclear-armed countries spent more than 100 billion USD each year in 2024 (approximately 2.2 million EUR per minute) on nuclear arsenals, which increased by 11% compared to the preceding year [39]. The US alone dedicated $56.8 billion, more than all the other nuclear-armed states combined. Across a five-year period, worldwide expenditure on nuclear weapons rose by 32% from $68bn to $100bn.

This spending model entails high opportunity costs. In this regard, it was estimated in a report submitted to the UN Secretary-General that USD 100 billion would be enough to end worldwide absolute poverty (which would need a total figure of USD 2.3-2.8 trillion) if channeled to relevant areas [40]. An evaluation by the UNDP discovered that for low- and middle-income countries a 1% increase in military expenditure leads more or less to decreases in public health services. Re-tasking just 15% of global military spending (USD 387 billion) would meet the annual costs of climate change adaptation in developing countries.

The comparison brings forth several key lessons for economic efficiency in international paradigms of mediation on nuclear disarmament. Hybrid mediation models that combine a formal institutional framework with targeted technical cooperation programmes are also proven to be more cost-effective than monocausal interventions. The learning from the START/CTR program was that a return-on-investment in excess of 20:1

was achieved despite high implementation costs, supporting this institutional design principle.

Second, regional institutional mechanisms such as CANWFZ tend to be more cost-effective than universal instruments - economies of scale in administration costs; the use of standing verification bodies mean they can engage initial compliance assessment from day 1; coordinating the response among geographically adjacent states with overlapping security interests is easier. The CANWFZ host-country cost-sharing regime and the IAEA safeguard linkage provide illustrations of good institutional design.

Third, verification mechanisms offered in mediation architectures can save transaction costs compared to separate verification infrastructures. AE&M IAEA IS go down this road, where underdevelopment verification technologies (zero-knowledge protocols, machine learning enabled capabilities) offer additional costs reductions. Fourth, the institutional innovations of Kazakhstan such as voluntary denuclearization, CANWFZ leadership, and IAEA LEU Bank hosting provide templates for cost-effective disarmament diplomacy based on norms-based global governance and regional cooperation.

Finally, the huge gap between global spending on military (USD 2.7 trillion in 2024) and disarmament verification investment (an estimated USD 120-170 million for IAEA safeguards) represents a significant misallocation of security resources. Even slight re-tasking of resources toward verification and confidence-building mechanisms could do wonders to increase disarmament implementation capability, all the while delivering good security and economic returns. Such results have immediate relevance for future disarmament accords attempted by policymakers, and to Kazakhstan’ s ongoing stewardship concerning global nuclear governance.

Conclusion. This study has showed by the comparative institutional analysis that economic efficiency is a key - yet just unexplored - dimension to international mediation mechanisms in nuclear disarmament processes. The observed empirical patterns across four existing nuclear governances Mechanisms-Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT), International Atomic Energy Agency (IAEA) safeguards regime, bilateral arms control like START/CTR and Central Asian Nuclear-Weapon-Free Zone (CANWFZ)-demonstrate significant differences in cost-effectiveness depending on particular elements of institutional design. These implications directly challenge the perception that more complex multilateral institutions generate better outcomes and highlight how simpler, strategically designed agreements often deliver as good or better outcomes at much lower cost.

The dissenting four main research hypotheses have been tested by the documentary analysis and cost-structure comparison. First, hybrid mediation models, whereby formal institutional mechanisms are integrated with specialized technical cooperation instruments yield very high cost-effectiveness ratios: more than 20:1 when measured in security terms (see the START/CTR case). In this paper, hybridization specifically denotes «nesting» technical cooperation and verification toolkits inside treaty-based governance cycles (rather than running parallel structures), which is the key mechanism behind the observed cost-effectiveness differences. Second, efficient verification - transparent systems the second point is that transparency in verification can lead to much greater efficiency of mediation integrated verification than parallel, autonomous systems of verification as shown by IAEA IS analysis. Third, regional institutions such as the CANWFZ also offer much greater cost-effectiveness than universal mechanisms (through economies of scope, a minimum of overhead and management burden sharing across states) as well as leveraged use of existing verification infrastructure. Last one, institutional design attributes that focus on data standardization and inspection protocol sharing effectively reduces transaction costs of compliance verification.

This study contributes in important ways to our knowledge of international governance and arms control. At a concept level, it extends institutionalist concepts to incorporate transaction

cost economics constructs at the conceptual level, dumping empirics that illustration was available of the extent design variables make for differential cost-efficiency outcomes irrespective of de jure legal authority. Disciplinary framing at the disciplinary level, the article responds to a long-standing analytical divide between international law scholarship (focused on verification standards and legal compliance) and economics literature (analyzing implementation costs) by integrating these insights in an overarching analytical framework, the cataloging of individual design elements - host-country burden-sharing, integration verification, standardization of data, and regional coordination - yields operational advice for architects who build institutions in future disarmament agreements.

Kazakhstan' s institutions of innovation will continue to offer us evidence-based replicable models for cost-efficient disarmament diplomacy, including voluntary denuclearization, CANWFZ leadership, IAEA LEU Bank hosting and the International Day Against Nuclear Testing. The documentary record shows that Kazakhstan attained these results not through outsized financial resources but by strategic institutional placement, moral authority based on historical fact and an efficient burden-sharing arrangement. This is especially relevant for developing countries that aim to shape international nuclear governance, but must work with limited resources.

From a humanitarian perspective, the research uncovers an essential economic irrationality in today's global security: countries spend jointly some 750 times the annual verification budget of IAEA on military expenditure with verifying infrastructure remaining chronically underfunded - an estimate that carries distinct relevance to future challenges posed by unilateral interests and approaches. This misdirection is both a security problem and an economic opportunity. Lifting even relatively small percentages of military expenditure from weapons production for verification and mediation measures would vastly increase disarmament enforcement capabilities. The remarkably favorable cost benefit ratios found in this study -especially the 1:20 ratio of return on investment for START/CTR agreements - indicate that reallocating such funds would improve not only our security, but also generate economic benefits.

This study suggests some potential areas for further study. The first is that cost-effectiveness longitudinally analyzed as the Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons (TPNW) takes hold and evidence is collected could be useful for comparison purposes. Second, quantifying the effects of innovations in verification technologies (for example: zero-knowledge protocols and machine learning) might be able to extrapolate cost savings expected from future disarmament verification regimes. Third, cross-hybrid learning on burden-sharing mechanisms with other international regimes (climate and humanitarian intervention and pandemic governance) could potentially test the generalizability of efficiency principles found in nuclear domains. Fourth, the cooperation of institutional economics, technology assessment and analysis of diplomatic negotiations could be utilized in interdisciplinary research aimed at creating predictive models for the optimal solutions to disarmament arrangement.

In summary, this study defines economic efficiency as an instrumental and empirical facet of the institutional effectiveness in international nuclear governance. By showing stem-levels that certain institutional designs are more likely to generate cost-effective outcomes, the article lays empirical groundwork for evidence-based institution design in future disarmament negotiations. Developing countries have much to learn from Kazakhstan' s demonstrated ability to drive globally significant denuclearization initiatives and leverage resource efficiencies, one that can be tailored for their own use. Its larger relevance lies not only as a contribution to our knowledge, as it is an outstanding model of how «real» disarmament diplomacy could work if structured well or implemented wisely, but also it sheds light on the fact that economic efficiency and disarmament effectiveness are not mutually exclusive goals; rather they can be made compatible goals through good institutional

design. Such efficiency principles might well be an interesting lens through which to focus on the institutional design process in contributing to a greater likelihood of success with disarmament agreement and more appropriate use, in conformity with the logic of collective action, for scarce global resources committed to nuclear governance/peace building priorities.

Funding. *This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number AP 25795633.*

References:

1. Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons//International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA Publications 1970. [E-resource]. URL:https://www.iaea.org/topics/non-proliferation-treaty. Date of access: 27.11.2025.

2. Dorn W. The Case for a United Nations Verification Agency // Disarmament Forum. - 2006 [E-resource]. URL: https://walterdorn.net/20-the-case-for-a-united-nations-verification-agency-disarmament-under-effective-international-control. Date of access: 27.11.2025

3. The NPT and the TPNW: Compatible or conflicting nuclear disarmament agendas? // Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). - 2019. [E-resource]. URL: https://www.sipri.org/commentary/blog/2019/npt-and-tpnw-compatible-or-conflicting-nuclear-weapons-treaties. Date of access: 27.11.2025

4. Speakers Urge Efficient Financial Management, Avoiding Duplicate Processes, as Fifth Committee Examines Programme Budget Implications of Disarmament-Related Texts // UN Press Release. - 2023. [E-resource]. URL: https://press.un.org/en/2023/gaab4445.doc.htm Date of access: 27.11.2025

5. Susan W. Costs of Disarmament — Disarming the Costs: Nuclear Arms Control and Nuclear Rearmament // UNIDIR. - 2003. [E-resource]. URL: https://unidir.org/files/publication/pdfs/costs-of-disarmament-disarming-the-costs-nuclear-arms-control-and-nuclear-rearmament-306.pdf Date of access: 27.11.2025

6. Central Asian Nuclear-Weapon-Free-Zone // NTI. [E-resource]. URL: https://www.nti.org/education-center/treaties-and-regimes/central-asia-nuclear-weapon-free-zone-canwz/ Date of access: 27.11.2025

7. Abuova N. Kazakhstan Hosts Workshop to Strengthen Cooperation between Nuclear-Free Zones// Astana Times. - 2024. [E-resource]. URL: https://astanatimes.com/2024/08/kazakhstan-hosts-workshop-to-strengthen-cooperation-between-nuclear-free-zones/ Date of access: 27.11.2025

8. Kazakhstan’s contribution to nuclear disarmament, non-proliferation and peaceful use of nuclear energy // Government of Kazakhstan (Ministry of Foreign Affairs). - 2021. [E-resource]. URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/mfa-amman/press/article/details/59812?lang=en.- Date of access: 04.01.2026.

9. Kreps S.E. The Institutional Design of Arms Control Agreements // Foreign Policy Analysis. - 2018. - Vol.14(1) - P.127-147. DOI 10.1093/fpa/orw045.

10. Fortna V. P. Peace Time: Cease-Fire Agreements and the Durability of Peace // Princeton University Press. - 2004.- 264 p.

11. Baumol W. J. Williamson’s The Economic Institutions of Capitalism [Review of The Economic Institutions of Capitalism., by O. E. Williamson] // The RAND Journal of Economics. - 1986. - 17(2). - P. 279-286. DOI 10.2307/2555390.

12. Fuhrmann M. and Yonatan Lupu. Do Arms Control Treaties Work? Assessing the Effectiveness of the Nuclear Nonproliferation Treaty // International Studies Quarterly. - 2016. - 60, - No.3. - P.530-539. DOI

10.1093/isq/sqw013.

13. Erästö Tytti, Ugnė Komžaitė and Petr Topychkanov. Operationalizing nuclear disarmament verification// Stockholm international peace research institute. - 2019. [E-resource]. URL:

https://www.sipri.org/sites/default/files/2019-04/sipriinsight1904_0.pdf.- Date of access: 27.11.2025.

14. Zhomartkyzy M. The role of mediation in international conflict resolution // Law and Safety. - 2023. - 90(3). - P.169-178. DOI 10.32631/pb.2023.3.14.

15. The Agency' s Draft Budget Update for 2025. Document GC/68-5 // Vienna: IAEA. [E-resource]. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc68-5.pdf. - Date of access: 27.11.2025.

16. Mayhew N., Kirsten I. Navigating the IAEA Budget Process // Vienna Center for Disarmament and Non-Proliferation. - 2023. [E-resource]. URL: https://vcdnp.org/wp-content/uploads/2023/08/print_navigating_the_iaea_budget_process_rev.1.pdf .-Date of access: 27.11.2025.

17. SIPRI contributes to global UN report on military expenditure // Stockholm: Stockholm International Peace Research Institute. - 2025. [E-resource]. URL: https://www.sipri.org/news/2025/sipri-contributes-global-un-report-military-expenditure.- Date of access: 27.11.2025

18. Ileana Exaras. Military spending worldwide hits record $2.7 trillion // UN News. - 2025. [E-resource]. URL: https://news.un.org/en/story/2025/09/1165809. - Date of access: 27.11.2025.

19. Record military spending threatens global peace and development, new UN report warns// New York: United Nations Development Programme. - 2025. [E-resource]. URL: https://www.undp.org/press-releases/record-military-spending-threatens-global-peace-and-development-new-un-report-warns.- Date of access: 27.11.2025.

20. START I. // US Department of state. - 2004 [E-resource]. URL: 2004 Treaties and Agreements - United States Department of State .-Date of access: 27.11.2025

21. From Donor to Partner: The Evolution of U.S. Cooperative Threat Reduction // Washington: Nuclear Threat Initiative. - 2011. [E-resource]. URL: https://www.nti.org/analysis/articles/donor-partner-evolution-us-cooperative-threat-reduction-global-security-engagement/.- Date of access: 27.11.2025

22. Cooperative Threat Reduction Program Fiscal Year (FY) 2025 Budget Estimates // Washington: DoD Comptroller. - 2024 [E-resource]. URL: https://comptroller.war.gov .- Date of access: 27.11.2025.

23. Kakatkar Manasi and Miles A. Pomper. Central Asian Nuclear-Weapon-Free Zone Formed// Arms Control Today. - 39. - No.1. - 2009. - P.42 - 42.

24. Marco Roscini. Something Old, Something New: The 2006 Semipalatinsk Treaty on a Nuclear Weapon-Free Zone in Central Asia // Chinese Journal of International Law. -Vol.7(3). - 2008. - P.593-624. DOI 10.1093/chinesejil/jmn033.

25. NPT Review Process: An Explainer // Vienna: Vienna Center for Disarmament and Non-Proliferation. - 2023 [E-resource]. URL: https://vcdnp.org/wp-content/uploads/2023/07/web_npt_review_process_07212023.pdf . -Date of access: 27.11.2025.

26. Financing the NPT Review Process. Working paper presented to the second session of the Preparatory Committee for the 2010 Review Conference // US Department of State. - 2008 [E-resource]. URL: https://2001-2009.state.gov/t/isn/rls/other/114114.htm. - Date of access: 27.11.2025.

27. Zoe N. Gastelum. Quantifying Safeguards Innovations: Impacts of Innovations on International Atomic Energy Agency Safeguards Inspection Effort // Journal for Peace and Nuclear Disarmament. - 2024. - No 7(1). - P.236-263. - DOI 10.1080/25751654.2024.2364962.

28. Verification of Nuclear Disarmament: Capstone Report // Washington: International Partnership for Nuclear Disarmament Verification. - 2024 [E-resource]. URL: https://www.ipndv.org/wp-content/uploads/2024/06/IPNDV-Capstone_FINAL-1.pdf.- Date of access: 27.11.2025.

29. Philippe S., Goldston R., Glaser A. et al. A physical zero-knowledge object-comparison system for nuclear warhead verification // Nat Commun. -2016.- No 7:12890. DOI 10.1038/ncomms12890.

30. D. Kairolda. The Silent Fallout: The Legacy of Soviet Nuclear Testing in Kazakhstan // Nuclear Age Peace Foundation. - 2025. [E-resource]. URL: https://www.wagingpeace.org/the-silent-fallout-the-legacy-of-soviet-nuclear-testing-in-kazakhstan-and-its-modern-day-impacts/ - Date of access: 27.11.2025.

31. Satubaldina A. UN' s Izumi Nakamitsu Highlights Kazakhstan' s Moral Leadership in Nuclear Disarmament // The Astana Times. - 2024 [E-resource]. URL: https://astanatimes.com/2024/08/uns-izumi-nakamitsu-highlights-kazakhstans-moral-leadership-in-nuclear-disarmament/.- Date of access: 27.11.2025.

32. Nuclear Disarmament Kazakhstan // Washington: NTI. - 2024. [E-resource]. URL: https://www.nti.org/analysis/articles/kazakhstan-nuclear-disarmament/.- Date of access: 27.11.2025.

33. Velichkov K. Kazakhstan's nuclear governance as a foreign policy ASSET // NNC RK Bulletin. - 2021. - No (3). -P.21-28. DOI 10.52676/1729-7885-2021-3-21-28.

34. Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons // New York: United Nations. - 2017 [E-resource]. URL: https://ihl-databases.icrc.org/assets/treaties/640-TPNW-EN.pdf .- Date of access: 27.11.2025.

35. Patton T., Philippe S., & Mian Z. Fit for Purpose: An Evolutionary Strategy for the Imple-mentation and Verification of the Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons//Journal for Peace and Nuclear Disarmament. - 2019. - No 2(2). - P.387 - 409. DOI 10.1080/25751654.2019.1666699.

36. Amanzholov Zh. M., Ahmetov E. B. Bez"yadernaya zona v Tsentral' noi Azii i ee rol' v ramkakh voenno-politicheskogo izmereniya deyate// International Relations and International 38. Law Journal. - 2016. - No.59(3). - S.42-48. [in Russian]

37. Budlong J. The Institutional Design of Arms Control: To What Extent Does Institutional Design Increase the Longevity of Arms Control Agreements? // Electronic Theses and Dissertations of University of Denver. - 2021. [E-resource]. URL: https://digitalcommons.du.edu/etd/1921.- Date of access: 27.11.2025.

38. What are the most effective conflict mediation techniques used in international diplomacy, and how can case studies from the United Nations support these methods? // PsicoSmart. - 2025. [E-resource]. URL: https://blogs.psico-smart.com/blog-what-are-the-most-effective-conflict-mediation-techniques-used-in-inte-188010. - Date of access: 27.11.2025.

39. Global spending on nuclear weapons topped $100 billion in 2024 // Geneva: International Campaign to Abolish Nuclear Weapons. - 2025. [E-resource]. URL: https://www.icanw.org/global_spending_on_nuclear_weapons_topped_100_billion_in_2024.- Date of access: 27.11.2025.

40. The Security We Need: Rebalancing Military Spending for a Sustainable and Peaceful Future // United Nations: Peace and Security. - 2025. [E-resource]. URL: https://www.un.org/en/peace-and-security/the-true-cost-of-peace .- Date of access: 27.11.2025.

Information about authors

Bolat A. -master of law, I. Zhansugurov Zhetysu University Taldykorgan, Taldykorgan, Kazakhstan, e-mail: a.bolat.edu@gmail.com;

Kassymova A.- PhD, I. Zhansugurov Zhetysu University, Kazakhstan, e-mail: aiko_1990kz@mail.ru;

Jangeldina D. - Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: dariga_da@mail.ru;

Kurmankulova N.- candidate of economical sciences, associate professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Busines, Astana, Kazakhstan, e-mail: nurgik-7@mail.ru.

Сведения об авторах

Болат А.А.- магистр юридических наук, Жетысуский университет им. И. Жансугурова, Талдыкорган, Республика Казахстан, e-mail: a.bolat.edu@gmail.com;

Касымова А.М.-доктор философии (PhD), Жетысуский университет им. И. Жансугурова, Талдыкорган, Республика Казахстан, e-mail: aiko_1990kz@mail.ru;

Джангельдина Д.И.-к.п.н., доцент, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Қазақстан, e-mail: dariga_da@mail.ru;

Курманкулова Н.Ж.- к.э.н., асс.профессор Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Қазақстан, e-mail: nurgik-7@mail.ru.

IRSTI 06.81.30 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1439**

MERGERS AND ACQUISITIONS: THE ROLE OF DUE DILIGENCE IN M&A OUTCOMES

A. Amanbekova
Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan
Corresponding author: amanbekovaidana@gmail.com

The article establishes due diligence as the essential factor which decides M&A transaction success through its core purpose. Organizations need due diligence (hereinafter referred to as “DD”) as their essential M&A success factor because it enables them to reach their objectives through unstable market conditions and complicated business operations. The Bain & Company survey shows that most failed deals result from various factors which include DD-related issues that lead to incorrect synergy assessments and failed due diligence that missed important problems and target companies that received artificial enhancements for sale purposes and targets that lack proper strategic alignment and teams ignored their concerns while participating in the competitive auction process. The research findings show that DD serves as the fundamental component because it establishes the level at which organizations achieve their strategic decision implementation regarding integration and synergy assessment and risk management.

The research uses secondary data analysis to develop multiple proxy variables which measure DD quality and then evaluates these variables against their effects on deal achievement. The regression analysis is performed to assess outcomes by using the change in acquirer stock price as the dependent variable which measures price changes from pre-announcement to post-closing periods.

Keywords: due diligence, mergers and acquisitions, role of due diligence in deal success, stock price change after deals, market volatility, regression analysis, share price reaction

БІРІГУ ЖӘНЕ ЖҰТЫЛУ: БІРІГУ ЖӘНЕ ЖҰТЫЛУ НӘТИЖЕЛЕРІНДЕГІ ДЬЮ ДИЛИДЖЕНСТІҢ РӨЛІ

А.М. Аманбекова
Қазақстан-Британ Техникалық Университеті, Алматы, Қазақстан,
e-mail: amanbekovaidana@gmail.com

Бұл мақаланың мақсаты - бірігу және жұтылу мәмілелеріндегі дью дилидженс процесінің маңызын түсіндіру. Нарықтағы жоғары құбылмалылық және корпоративтік стратегиялардың барған сайын күрделенуі жағдайында дью дилидженс (ДД) бірігу және жұтылу (М&А) мәмілелерінің тиімділігін қамтамасыз етудегі негізгі кезеңге айналады. Bain & Company жүргізген сауалнама нәтижелеріне сәйкес, сәтсіз мәмілелердің көпшілігі бірқатар себептермен түсіндіріледі, олардың көбі ДД-ге қатысты факторлар болып табылады: синергияның асыра бағалануы, дью дилидженстің негізгі мәселелерді анықтай алмауы, мақсатты компанияның сату үшін «әсемделуі», стратегиялық сәйкестіктің жеткіліксіздігі, күмәнді белгілердің еленбеуі, сондай-ақ тендерлік бәсекенің қызуына еріп кету. Осы тұжырымдарға сүйене отырып, ДД рөлін іргелі деп санауға болады: дәл осы кезеңде интеграция, синергияны бағалау және тәуекелдерді басқару бойынша кейінгі стратегиялық шешімдердің сапасы қалыптасады.

Бұл жұмыста екінші реттік деректерді талдау тәсілі қолданылады: ДД сапасын өлшеу үшін бірнеше прокси-көрсеткіш ұсынылып, олардың мәміленің табыстылығына әсерін эмпирикалық түрде тексеріледі. Нәтижелерді бағалау үшін регрессиялық талдау жүргізіледі, мұнда тәуелді айнымалы - мәміле жарияланғанға дейінгі кезең мен мәміле жабылғаннан кейінгі кезең арасындағы сатып алушы компанияның акция бағасының өзгерісі.

Түйін сөздер: дью дилидженс, бірігу және жұтылу, мәміленің сәтті болуындағы дью дилидженстің рөлі, мәмілелерден кейін акция бағаларының өзгеруі, нарық құбылмалылығы, регрессиялық талдау, акция бағаларының реакциясы

СЛИЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ: РОЛЬ ДЬЮ ДИЛИДЖЕНСА В РЕЗУЛЬТАТАХ СЛИЯНИЙ И ПОГЛОЩЕНИЙ

А.М. Аманбекова

Казахстанско-Британский Технический Университет, Алматы, Казахстан,
e-mail: amanbekovaidana@gmail.com

Цель этой статьи - объяснить важность дью дилидженса в сделках слияний и поглощений. В условиях высокой волатильности рынков и усложнения корпоративных стратегий дью дилидженс (ДД) становится ключевым этапом обеспечения эффективности сделок по слияниям и поглощениям (M&A). Согласно результатам опроса Bain & Company, большинство неудачных сделок объясняется рядом причин, многие из которых являются ДД-факторами, такими как: переоценка синергий, неспособность дью дилидженса выявить ключевые проблемы, «приукрашивание» целевой компании перед продажей, недостаточное стратегическое соответствие, игнорирование сомнений и предупреждающих сигналов, а также вовлечение в азарт конкурентных торгов. Исходя из этих выводов, роль дью дилидженса можно считать фундаментальной: именно на этом этапе формируется качество дальнейших стратегических решений по интеграции, оценке синергий и управлению рисками.

В данной статье используется подход анализа вторичных данных, предлагающий ряд прокси-показателей для измерения качества ДД и эмпирически оценивающий их влияние на успешность сделки. Для оценки результатов проводится регрессионный анализ, где зависимой переменной выступает изменение стоимости акций компании-покупателя между периодом до объявления сделки и периодом после её закрытия.

Ключевые слова: дью дилидженс, слияния и поглощения, роль дью дилидженса в успешности сделок, изменение цены акций после сделок, волатильность рынка, регрессионный анализ, реакция цены акций

Introduction. Mergers and acquisitions (hereinafter referred to as “M&A”) require due diligence (hereinafter referred to as “DD”) because M&A transactions generate unpredictable results which result in various acquisition deal outcomes. M&A serve as a strategic growth tool which appears frequently, and many research show that acquisition performance for acquiring companies remains uncertain after deal completion.

For example, a key study by King et al. (2003) [1] summarizes many empirical works, which prove that in the average M&A deals results are not consistently positive for acquirers, and the variation in outcomes remains large and partly unexplained. Researchers continue to seek “moderator factors” which will help them predict deal success or failure during the initial preparation phase. Due diligence is important here, because it is a systematic review of the target company that helps identify risks, assumptions, and structural issues that can strongly affect post-deal performance.

Market practice confirms that due diligence is one of the main “bottlenecks” in successful deal closing. The KPMG 2025 M&A Deal Market Study (survey of 300 deal professionals) [2] shows that completing due diligence is among the top three obstacles to closing deals, in line with valuation and integration-related issues. The study reports that 41% of respondents mention completing due diligence as a critical difficulty during the deal process. This supports the idea that due diligence is not a formal checklist, but a key stage that can slow down, complicate, or block a deal. Also, according to this study, the rising number of deal risks demands advanced valuation models which need more information and stronger regulatory standards, thus due diligence serves as a vital assessment tool that affects deal length, market confidence, and transaction success rates.

Consulting practice also indicates that most M&A failures result from integration problems and incorrect synergy assessments, which should

be detected during due diligence evaluation. For example, the Bain report “The Merger Before the Merger” [3] lists key reasons why deals break down, according to their conducted survey, which include (Fig.1):

- Due diligence failed to highlight key issues
- Target was dressed up for sale
- Insufficient strategic fit
- Doubts were pushed aside
- Caught up in the bidding process

These factors are strongly linked to due diligence quality. They create “hidden risk” effects where the buyer overestimates value, underestimates integration challenges, and closes the deal with incomplete information.

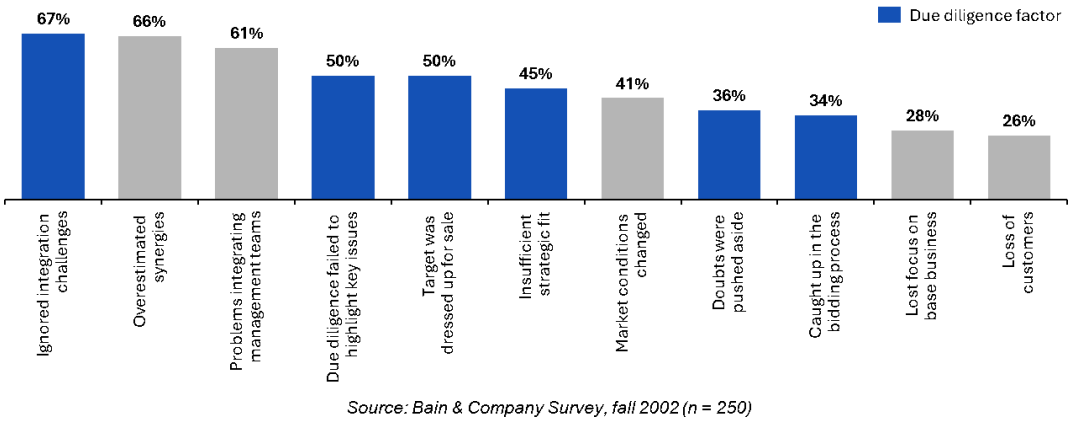


Fig.1 - Results of the Bain & Company Survey (n = 250)

In addition, the McKinsey report ”Where mergers go wrong” [4] also identifies overestimation of synergies as a stable problem which results in the ”winner’ s curse” because the auction winner ends up paying excessive amounts as a result of unrealistic expectations and insufficient proof of their assumptions. The process fails to demonstrate actual project risks and integration challenges and required resources when due diligence is not fully completed.

Hence, the research findings will have the following practical significance:

- due diligence factors linked to deal success can transform due diligence from “checklist” to measurable KPIs and predictive risk markers. If due diligence quality indicators statistically explain buyer’s stock price reaction to the conducted deals, then they can be translated into management actions as: 1) Due diligence scope and depth requirements;
- criteria for advisor selection;
- risk adjusted valuation and SPA protection.

The theoretical significance of the research will combine three literature streams that usually studied separately:

- event studies (market reaction to corporate events);
- accounting signals (post-deal reporting outcomes, such as impairment);
- due diligence literature (due diligence as a tool to reduce information asymmetry).

Finally, successful M&A is important not only on the corporate level, but beyond it. M&A reallocates capital, restructures industries, and transforms economies. Research suggests deals shape market structure, enable exit of weak players, speed up technology renewal, and help industries adapt to shocks (Andrade, Mitchell & Stafford, 2001 [5]; Andrade, 2004 [6]; Breinlich, 2008 [7]). Cross-border M&A is also part of FDI flows and supports transfer of technology and management practices (UNCTAD WIR series [8]). Failures destroy value and may create political risks and lower trust in cross-border investments.

In addition, the effectiveness of a due diligence

can vary depending on the mechanism for the purchase price under the Sales and Purchase Agreement (SPA). In international M&A practice, the two most common mechanisms are the “locked box” and “completion accounts”. Due diligence under the two mechanisms is carried out differently.

Under the locked box mechanism, the purchase price is determined based on the company’s historical financial statements as of a particular date in the past (the “locked box date”). This means that the due diligence exercise will have two phases: 1) a detailed review of the historical financial statements and the key financial metrics underlying the purchase price calculation, and 2) a more general review of the period since the locked box date to ensure that there have been no material leakage transactions which could allow the sellers to extract value from the company at the buyer’s expense.

On the other hand, under the completion accounts mechanism, the purchase price is calculated on the basis of the financial performance of target company as of the date of completion of transaction. Therefore, the price adjustment is done post-closing and the need of detailed review of the period between signing and closing of the transaction is reduced. The target company’s historical financial statements and financial metrics, such as net debt and net working capital, are reviewed and are further included in the purchase price calculation for the adjustment for completion accounts.

Thus, the due diligence under locked box mechanism is generally more detailed, since the purchase price is fixed, and a historical account has to be verified as to its accuracy and adequacy for the period from the effective date to the closing price. In a completion accounts mechanism, the focus is on the historical aspects and the contingent items which will impact future price adjustments, such as net debt and net working capital.

Materials and methods. This research examines whether higher due diligence quality leads to improved post-deal performance for the acquiring company. The central hypothesis proposes that a higher level of due diligence quality has a positive impact on the acquirer’s subsequent performance.

Research design and stages. The research proceeds through several steps. The first step was collecting secondary deal and market data, after that I built DD quality proxies and other control variables. After all data was collected, I estimated a linear regression model and checked multicollinearity using VIF. Lastly, I interpreted coefficients and statistical significance.

Data and materials. For the purposes of this research, I used secondary data collected from CapitalIQ and Refinitiv. The sample includes 39 deals, and sample size adequacy is justified using MacKinlay (1997) [9] power analysis. In MacKinlay’s example, event study test power with sample size around 30 is about 0.54, which has the power to identify a real effect. Since this study uses 39 observations (larger than 30), expected statistical power should not be lower than in that illustration. The research design with this sample size allows regression analysis through event study methods which follow established requirements.

Variables. The dependent variable measures post-deal performance for the acquirer and taken as a stock price change between before deal announcement and one year after deal closing (long-run returns). This reflects realization of expectations, ability to achieve synergies, integration success, and avoidance of overpayment. This approach is supported by long-run return studies: 1) Loughran & Vijh (2012) [10]: long-run returns of acquirers differ from short-run returns and depend on deal form and integration dynamics; 2) Rau & Vermaelen (1998) [11]: post-deal performance differs by bidder type and deal characteristics.

The *independent variables* are DD quality proxies (Table 1). A key limitation is that direct DD scope and true DD quality are not observable, as there is no available information about its underlying scope. Therefore, I used proxy variables:

- *information complexity of the target* - target type (private / public), industry (whether target is in a different industry than the buyer), country (cross-border or not);

- *deal duration* - days between announcement and closing. This is not a direct DD metric, but assumed that more time can allow more complete DD (based on [12]);

- *deal advisor* - advisor quality is treated as a valid independent variable because top-tier M&A advisors can provide better analysis, better risk detection, and better structuring, affecting both short-run market reaction and long-run performance. This is supported by work linking advisor choice to bidder returns (Golubov, Petmezas & Travlos [13]; Rau, 2000 [14]). The mechanism is reduction of information asymmetrical and lower risk of overpayment or wrong synergy assumptions;

- *goodwill impairment* - goodwill impairment in the first 1-3 years after the deal is used as a proxy for DD quality because it reflects how correct pre-acquisition assessments were, whether expected synergies were realized, and whether acquirer overpaid for the target company. The research by Wangerin (2019) [12] and Potepa & Thomas (2022) [15] shows that poor debt disclosure practices result in higher impairment costs and lower business performance and wrong fair value evaluations. Therefore, impairment is treated as an objective ex-post signal of DD effectiveness.

Lastly, controls include payment method, acquirer size and performance, and relative deal size.

Table 1 - Variables for regression

Variable name	Unit	Definition	Source
Performance	ln	Natural logarithm of the acquirer's stock price change (pre-announcement vs 1 year after closing)	CapitalIQ, Refinitiv
Target type	dummy	Whether the target company is private or public	CapitalIQ, Refinitiv
Industry	dummy	Whether the target company from the same industry as acquirer	CapitalIQ, Refinitiv
Country	dummy	Is the deal cross-border	CapitalIQ, Refinitiv
Deal duration	days	Number of days between deal announcement and deal closing	CapitalIQ, Refinitiv
Advisor	dummy	Whether the deal advisor was top-tier (e.g. Morgan Stanley, Goldman Sachs etc.)	CapitalIQ, Refinitiv
Impairments	dummy	Wheter the acquirer had a goodwill impairment in the first 1-3 years after the deal closed	CapitalIQ, Refinitiv
Payment	dummy	The deal's payment method (cash / equity)	CapitalIQ, Refinitiv
Relative deal size	USDm	The deal's size relatively to acquirer's market capitalization	CapitalIQ, Refinitiv
Acquirer equity value	USDm	The equity value of acquirer	CapitalIQ, Refinitiv
Acquirer ROA	%	ROA of acquirer	CapitalIQ, Refinitiv
Acquirer leverage	%	Acquirer's debt-to-equity ratio	CapitalIQ, Refinitiv

Regression model. For the purposes of this research I made multifactor linear regression model:

$$\text{Performance}_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DDQuality}_i + \beta_2 \cdot \text{Controls}_i + \epsilon_i \quad (1)$$

Where: 1) Performance$_i$ = stock price change (pre-announcement vs 1 year after closing); 2) DDQuality$_i$ = DD proxies; 3) Controls$_i$ = control variables; 4) ϵ_i = error term.

After regression model was runed, I also conducted multicollinearity test, where VIF = 1.432, which suggests no multicollinearity concerns.

Results and Discussion. In this study, I evaluate statistical significance at the 90% confidence level ($\alpha = 0.10$). This choice is based on the event-study econometrics literature, which explains that return-based tests can have limited statistical power in small samples and that inference depends on sample size and return volatility. Following this guidance, I report results that are significant at the 10% level as economically meaningful signals that should be tested further in larger samples. (Kothari & Warner, 2004) [16].

Model fit. The model explains about 30% of the variation in the dependent variable (R^2 = 0.302), while the adjusted R^2 is 0.140 (Table 2). In M&A return regressions, such values are acceptable because stock return outcomes are noisy and influenced by many unobservable factors. Prior evidence suggests that cross-sectional models predicting acquirer stock-return reactions often have low explanatory power, so these fit measures are reasonable for this market setting. (Quariguasi Frota Neto et al., 2025 [17]).

Table 2 - Multifactor regression model results

Regression Statistics	
Multiple R	0.549265181
R Square	0.301692239
Adjusted R Square	0.139509534
Standard Error	0.415057657
Observations	39

Table 3 - Multifactor regression model results

	Coefficients	**Standard Error**	**P-value**
Target type (dummy)	0.076671579	0.165979733	0.647254323
Industry (dummy)	0.031494975	0.14875856	0.833669167
Country (dummy)	-0.097429955	0.186519835	0.605019448
Deal duration	-3.94365E-05	0.001044216	0.970108425
Advisor (dummy)	0.344301484	0.183779515	0.070164574
Impairments (dummy)	-0.301884692	0.154618128	0.059679329
Payment (dummy)	0.101490258	0.153903257	0.5143302

Key DD-related findings (Table 3). Advisor (dummy) has a positive coefficient (+0.344) and is marginally significant ($p \approx 0.07$). The coefficient on Advisor is +0.344 with $p = 0.070$. Since $p < 0.10$, this variable is significant at the 90% confidence level. The positive sign indicates that working with an experienced (top-tier) advisor who represents superior deal due diligence and structure leads to better one-year post-deal stock performance for the acquiring company.

Impairments (dummy) has a negative coefficient (-0.302) and is also marginally significant ($p \approx 0.06$) at the 90% confidence level. The negative sign indicates that deals followed by goodwill impairment within 1-3 years tend to have worse one-year post-deal stock price performance. The evidence supports impairment as an ex-post signal which reveals unmet expectations and possible overpayment and unidentifiable risks that became apparent after the transaction completion.

Other variables. The regression results show that target type and industry similarity and country and deal duration and payment method do not affect the outcome because their p-values are high. So in this sample and this specification they do not show strong independent explanatory power.

Conclusion. The goal of this study is to test whether due diligence quality affects M&A outcomes for the acquirer. The study uses a regression model within an event-study logic, where performance is measured as the acquirer's stock price change from before the announcement to one year after deal closing. DD quality is proxied by deal complexity measures, deal duration, advisor dummy, and post-deal goodwill impairment. The results demonstrate the following findings. The analysis shows that the Advisor dummy variable demonstrates a positive relationship with post-deal performance results at a marginally significant level ($p \approx 0.07$), the Goodwill impairment dummy variable produces negative results which affect post-deal performance at a marginally significant level ($p \approx 0.06$). Other variables are not significant. The present sample needs no further control procedures for the current assessment, as VIF indicates no multicollinearity (VIF ≈ 1.43).

The research findings indicate that DD-related conditions create significance for what happens after a deal is completed. Specifically: 1) Better advisor-related conditions (proxy for stronger analysis and structuring) are associated with higher post-deal stock price performance; 2) Goodwill impairment in the first 1-3 years after a deal is associated with worse post-deal performance and may reflect weak pre-deal screening, weak DD, or unrealistic synergy/valuation assumptions.

So, as a result, the research results confirm that due diligence functions as an invisible factor which links expected deal outcomes to actual post-acquisition performance.

References

1. King D.R., Dan D.R., Daily C.M., Covin J.G. Meta-analyses of post-acquisition performance: indications of unidentified moderators// Strategic Management Journal. -2004. - Vol.25(2). - P.187-200. DOI 10.1002/smj.371.

2. The KPMG 2025 M&A Deal Market Study. - 2025. URL: https://kpmg.com .- Date of access: 03.01.2026

3. Grob J., Meacham M. The merger before the merger/Bain and Company. -1999. . URL: https://www.bain.com .- Дата обращения:03.01.2026

4. Christofferson S.A., McNish R.S., Sias D.L. Where mergers go wrong/The McKinsey Quarterly. – 2004. - № 2.- P.1-7.

5. Andrade G., Mitchell M., Stafford E. New Evidence and Perspectives on Mergers// Journal of Economic Perspectives. -2001. -Vol.15 (2). - P.103-120. DOI 10.1257/jep.15.2.103.

6. Andrade G., Stafford E. Investigating the economic role of mergers// Journal of Corporate Finance. - 2004.- Vol.10(1). -P.1-36 DOI 10.1016/S0929-1199(02)00023-8.

7. Breinlich H. Trade liberalization and industrial restructuring through mergers and acquisitions// Journal of International Economics. -2008. -Vol.76(2). - P.254-266. DOI 10.1016/j.jinteco.2008.07.007.

8. UNCTAD World Investment Report. International investment in the digital economy. – 2025.-262 p. ISBN 978-92-1-003558-3.

9. MacKinlay A.C. Event Studies in Economics and Finance// Journal of Economic Literature. -1997.-Vol.35(1). - P.13-39.

10. Moeller S.B., Schlingemann F.P., Stulz R.M. Firm size and the gains from acquisitions// Journal of Financial Economics. -2004. -Vol.73(2). -P.201–228. DOI 10.1016/j.jfineco.2003.07.002.

11. Rau P.R., Vermaelen T. Glamour, value and the post-acquisition performance of acquiring firms// Journal of Financial Economics. -1998. -Vol.49(2). - P.223–253. DOI 10.1016/S0304-405X(98)00023-3.

12. Wangerin D. M&A Due Diligence, Post-Acquisition Performance, and Financial Reporting for Business Combinations// Contemporary Accounting Research. -2019.-Vol.36(4). - P.2344–2378. DOI 10.1111/1911-3846.12520.

13. Golubov A., Petmezas D., Travlos N.G. When It Pays to Pay Your Investment Banker: New Evidence on the Role of Financial Advisors in M&As// The Journal of Finance. -2012. -Vol.67(1). P.271–311. DOI 10.1111/j.1540-6261.2011.01712.x.

14. Rau P.R. Investment bank market share, contingent fee payments, and the performance of acquiring firms// Journal of Financial Economics. -2000. -Vol.56(2). - P.293–324. DOI:10.1016/S0304-405X(00)00042-8.

15. Potepa J., Thomas J. Goodwill Impairment After M&A: Acquisition-Level Evidence// SSRN Electronic Journal. -2022. -Vol.8(2). -P.131-155. DOI 10.2139/ssrn.4239812.

16. Kothari S.P., Warner J.B. The Econometrics of Event Studies// SSRN Electronic Journal. -2004. –Vol.1. DOI 10.2139/ssrn.608601.

17. Neto J.Q.F., Bozos K., Dutordoir M., Nikolopoulos K. Are acquirer stock price reactions to M&A announcements in any way predictable? A machine-learning analysis// Journal of the Operational Research Society. -2025. -P.1-23. DOI 10.1080/01605682.2025.2562956.

Information about the author

Amanbekova A. - Master’s student, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: amanbekovaidana@gmail.com.

Информация об авторе

Аманбекова А. М. - Магистрант, Казахстанско-Британский Технический Университет, Алматы, Казахстан, e-mail: amanbekovaidana@gmail.com.

МРНТИ 06.39.31 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1500**

РАЗВИТИЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИКИ КАЗАХСТАНА

[1]Ш.А. Смагулова, [2]С.З. Кажимуратова, [3]Г.К. Койшинова, [4]А.А. Жетписбаева, [5]С.Т. Жакупова, [6]М.Д. Ахметова

[1,5]Университет Международного Бизнеса им. Кенжегали Сагадиева, Алматы, Казахстан,
[2,6]НАО Университет Нархоз, Алматы, Казахстан,
[3]Восточно-Казахстанский университет им. С.Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан,
[4]Казахский Национальный педагогический Университет им. Абая, Алматы, Казахстан

✉ *Корреспондент-автор: saltanat.kazhimuratova@narxoz.kz*

Цифровая трансформация государственного управления экономики направлена на активный переход органов власти на информационно-коммуникационные технологии в национальном хозяйстве в рамках внедрения и использования инновационных электронных платформ для эффективного взаимодействия с населением и представителями бизнес-среды.

Цель исследования заключается в обосновании социально-экономических факторов и представлении рекомендаций для совершенствования государственного управления цифровой трансформации экономического развития РК при помощи построения многофакторного регрессионного анализа. При написании статьи были применены методы - системного и логического обобщения, критической оценки библиографии, экономико-математического моделирования и прогнозирования, анализа и статистики. Полученные результаты и выводы - осуществлен критический обзор первоисточников с точки зрения состояния и анализа реформ государственного управления экономическим развитием, реализован социально-экономический анализ электронного состояния госулуг, величины госслужащих, цифровых сервисов, проведено эконометрическое моделирование и даны прогнозы влияния цифровой инфраструктуры на уровень роста темпов ВВП Казахстана, приведены проблемы и представлены предложения по улучшению организации цифровой трансформации государственного регулирования экономического роста в РК.

Ключевые слова: цифровые платформы, инвестиции государства и предприятий в ИИ, государственные электронные услуги, цифровая трансформация, управление экономикой.

ҚАЗАҚСТАН ЭКОНОМИКАСЫН МЕМЛЕКЕТТІК БАСҚАРУДЫҢ ЦИФРЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯСЫН ДАМЫТУ

[1]Ш.А. Смагулова, [2]С.З. Қажымұратова, [3]Г.К. Қойшинова, [4]А.А. Жетпісбаева, [5]С.Т. Жакупова, [6]М.Д. Ахметова

[1,5]Кенжегали Сагадиев атындағы Халықаралық Бизнес Университеті, Алматы, Қазақстан,
[2,6]КЕАҚ Нархоз Университеті, Алматы, Қазақстан,
[3]С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университет, Өскемен, Қазақстан,
[4]Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,
e-mail: saltanat.kazhimuratova@narxoz.kz

Мемлекеттік экономиканы басқарудың цифрлық трансформациясы халықпен және бизнес ортасының өкілдерімен тиімді өзара әрекеттесу үшін инновациялық электрондық платформаларды енгізу және пайдалану арқылы мемлекеттік органдардың ұлттық экономикада ақпараттық-коммуникациялық технологияларға белсенді көшуіне бағытталған.

Зерттеудің мақсаты - көп айнымалы регрессиялық талдауды қолдана отырып, Қазақстан Республикасындағы экономикалық дамудың цифрлық трансформациясын мемлекеттік басқаруды жетілдіру бойынша әлеуметтік-экономикалық факторларды негіздеу және ұсыныстар ұсыну. Мақаланы

жазу кезінде келесі әдістер қолданылды: жүйелік және логикалық жалпылау, библиографияны сыни бағалау, экономикалық және математикалық модельдеу және болжау, талдау және статистика. Алынған нәтижелер мен қорытындыларға мемлекеттік экономикалық дамуды басқару реформаларының жай-күйі мен талдауы тұрғысынан бастапқы дереккөздерге сыни шолу; мемлекеттік қызметтердің электрондық жағдайының, мемлекеттік қызметшілердің санының және цифрлық қызметтердің әлеуметтік-экономикалық талдауы; цифрлық инфрақұрылымның Қазақстандағы ЖІӨ өсу деңгейіне әсерін эконометрикалық модельдеу және болжамдар; мәселелер талқыланып, ҚР экономикалық өсуді мемлекеттік реттеудің цифрлық трансформациясын ұйымдастыруды жетілдіру бойынша ұсыныстар ұсынылған.

Түйін сөздер: цифрлық платформалар, үкіметтік және кәсіпорындық инвестициялар, мемлекеттік электрондық қызметтер, цифрлық трансформация, экономикалық басқару.

THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TRANSFORMATION OF PUBLIC ADMINISTRATION OF THE ECONOMY OF KAZAKHSTAN

[1]Sh. Smagulova, [2]S. Kazhimuratova✉, [3]G. Koishinova, [4]A. Zhetpisbayeva, [5]S. Zhakupova, [6]M. Akhmetova

[1,5]Kenzhegali Sagadiyev University of International Business, Almaty, Kazakhstan,
[2,6]Narxoz University, Almaty, Kazakhstan,
[3]East Kazakhstan University named after S. Amanzholov, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
[4]Abai Kazakh Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: saltanat.kazhimuratova@narxoz.kz

The digital transformation of public economic management is aimed at the active transition of government bodies to information and communication technologies in the national economy through the introduction and use of innovative electronic platforms for effective interaction with the population and representatives of the business environment.

The purpose of the study is to substantiate socio-economic factors and present recommendations for improving the public administration of the digital transformation of economic development in the Republic of Kazakhstan through a multivariate regression analysis. When writing the article, the following methods were used: systemic and logical generalization, critical assessment of bibliography, economic and mathematical modeling and forecasting, analysis and statistics. The results and conclusions obtained include a critical review of primary sources from the point of view of the state and analysis of public economic development management reforms; a socio-economic analysis of the electronic state of public services, the number of civil servants, and digital services; econometric modeling and forecasts of the impact of digital infrastructure on the level of GDP growth in Kazakhstan; problems are discussed and proposals for improving the organization of the digital transformation of state regulation of economic growth in the Republic of Kazakhstan are presented.

Keywords: digital platforms, government and enterprise investments in AI, government e-services, digital transformation, economic management.

Введение. В феврале 2026г. А.Гутерриш - Генеральный секретарь ООН отметил значительную роль научных исследований и инноваций в международном управлении ИИ. В частности, он подчеркнул, что инновации в области искусственного интеллекта развиваются со скоростью света, опережая нашу коллективную способность в полной мере понимать их, не говоря уже об управлении ими» [1].

По данным ООН ускорение цифрового регулирования экономических процессов привело к росту мировой торговли до уровня 7%, что в абсолютной величине составляет около 35 трлн. долл. США. При этом, цифровизация сферы услуг приблизилась к 56% от всего мирового экспорта [2].

Другие исследователи обращают внимание

на аспекты устойчивости цифровых инициатив на примере оценки муниципалитетов Исландии (Sigurjonsson et al.2024). В частности, проведен анализ предоставления государственных услуг. На основе комплексного подхода авторы определили, что для оптимизации государственных услуг требуется активизировать процесс цифровой трансформации и автоматизации государственного управления [3].

Согласно оценкам «Digital 2026 Global Overview Report» сегодня 5,78 млрд. людей пользуются мобильными устройствами (чуть больше 70% от всего населения Земли). К началу 2026 года количество пользователей интернета в мире составило 6,04 млрд. человек. Если вернуться к истории появления первого вэб-сайта в 1991 г., то в тот период количество пользователей было приблизительно 5 млн. человек в мире [4].

Экономика Казахстана, очевидно, имеет высокую зависимость от углеводородного сырья. В этой связи необходимо активизировать процесс диверсификации секторов национального хозяйства. При этом акцент следует уделить структуре ВВП, экономическому развитию обрабатывающего сектора, электронным услугам и цифровым технологиям.

Выделим, 2026 г. объявлен в нашей стране - Годом развития цифровизации и ИИ с целью внедрения инноваций, обеспечения конкурентоспособности и устойчивого экономического роста. Необходимость цифровизации управления экономики продиктована ростом эффективности оказания госуслуг, прозрачности государственного регулирования экономических процессов. К тому же она стимулирует внедрение в деятельность отраслей IT, AI, помогает улучшать и развивать финансовые технологии на базе ИИ с использованием инновационных технологий, создавать новые рабочие места в сфере ИКТ, укреплять макроэкономическую стабильность и устойчивость государства.

Используя программу «VOSviewer» Smagulova et al. (2025), реализовали библиометрическую оценку лучших международных статей по вопросам цифровизации государственного регулирования с 1985 по 2024 годы [5]. Авторы сделали акцент на применении цифровых элементов при осуществлении зарубежных концепций, подходов и программ в сфере государственного управления экономическими процессами на примере лучших мировых практик.

С целью развития цифровизации в нашей стране приняты такие важные законодательные документы:

- Цифровой Кодекс РК, 2026 [6];

- Закон Республики Казахстан «Об искусственном интеллекте», 2025 [7];

- «Концепция развития искусственного интеллекта на 2024-2029 гг.», 2024 [8] и др.

Например, согласно Закону «Об искусственном интеллекте» - ИИ представляется объектом информатизации и важным инструментом в деятельности гражданина. Вместе с тем все пользователи несут полную ответственность по соблюдению безопасности, конфиденциальности и прозрачности в сфере работы ИИ.

В 2025 году в Казахстане организовано новое Министерство искусственного интеллекта и цифрового развития. Предполагается, что данная государственная структура будет позитивно воздействовать на последовательном и системном внедрении инструментов ИИ, развитии технологий и инновационной инфраструктуры, а также способствовать приобретению цифровых компетенций и квалификации кадров.

Отдельное внимание требуется уделить вопросам цифровизации государственного управления экономикой. Это предполагает повышение эффективности и рост информационно-технологического тренда общей экономической системы. Цифровые технологии непосредственно позволяют ускорить принятие управленческих решений, снизить издержки государственного управления, минимизировать погрешности менеджмента государственных служащих.

К тому же совершенствование электронных сервисов государства дают возможность - улучшить качество государственных услуг, уменьшить административные барьеры, казахстанским гражданам мобильнее получать услуги в

онлайн формате, сократить очереди и сроки получения разрешительных документов, упростить процесс регистрации бизнеса и ведения налоговой отчётности предприятий и пр.

В настоящее время благоприятными предпосылками формирования технологического развития и искусственного интеллекта (ИИ) в Казахстане представляются: цифровой потенциал, возможность адаптации законодательной базы, определенное наличие массива статданных, налаживание контактов с ведущими технологическими компаниями, увеличение государственной поддержки для стимулирования использования ИИ и др.

Существенной составляющей здесь также является цифровизация государственных услуг. Определенный уровень развития получил финтех-сектор и экосистема финансирования новых «IT-стартапов». Так, национальный инновационный кластер «Astana Hub» включает около 2000 предприятий, которые в том числе в 2025 г. обеспечили экспорт «IT-услуг» на сумму в размере 1 млрд долл. США.

Значительным позитивным условием организации новых ИКТ представляется запуск 2-х крупных суперкомпьютеров «Alem.Cloud» и «Al-Farabium» с высокой производительностью и применением чипов «NVIDIA».

Цифровизация госуправления стимулирует развитие: обрабатывающих отраслей, внедрение промышленных инновационных технологий, «e-commerce», «fintech», автоматизации разных социальных выплат и др.

Электронные и цифровые платформы способствуют понятной деятельности государства, развитию конкурентной среды, объективно принимать обоснованные решения и позволяют обществу мониторить управленческие процессы.

В конечном результате трансформация цифровизации экономической системы государственного управления позволит работать оперативнее, доступнее и прозрачнее, а также шире укреплять доверие общества к госорганам и улучшать эффективность реализации социальной политики.

Однако, серьезными недостатками развития цифровых технологий в республике сегодня являются - слабая степень развитости экосистемы инфраструктуры, низкие возможности потенциала инноваций, недостаточное количество больших технологических компаний, низкие уровни государственных и частных расходов на опытно-конструкторские и научно-исследовательские мероприятия, слабые возможности потенциала человеческого капитала и продвижения информационной культуры граждан, недостаточность внедрения интеллектуальных этических норм.

Методы и материалы. В научном исследовании Tutar (2025) определяется взаимодействие прозрачных отношений государства, политической активности и общественности в условиях цифровизации [9]. С помощью эконометрического моделирования и панельной регрессии были получены такие выводы. В частности, деятельность в социальных сетях стимулирует общественность для активного участия в работе электронного правительства. В свою очередь, это способствует продвижению и укреплению цифровой демократии в системе госуправления.

В этой работе будет построена множественная регрессионная модель с несколькими переменными:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m) + \epsilon \qquad (1)$$

Представим уравнение модели множественной регрессии, которая будет использована в нашем исследовании:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + \cdots + a_m X_m + \epsilon \quad (2)$$

где:

Y - зависимый показатель,

$X_1, X_2, \dots, X_m$- независимые факторы,

a_0 - свободный член модели,

$a_1, a_2, \dots, a_m$ - коэффициенты регрессии, характеризующие влияние определенного независимого показателя,

ϵ - случайная ошибка.

Здесь определенный коэффициент a_i демонстрирует, как изменится зависимый показатель Y при повышении некоторой переменной X_i на одну единицу, если все другие переменные будут при этом неизменными. По мнению Borriello (2025), цифровизация государственного управления на примере Италии демонстрирует важное значение для решения конфликтов в принятии определенных решений [10]. Ученый в своем исследовании с помощью моделирования экономических процессов на базе прикладной программы «NVivo» доказывает, что электронные и цифровые режимы положительно воздействуют на реформировании государственного сектора, обеспечения национальной безопасности и осуществления объективного мониторинга.

Цель представленного эконометрического моделирования - построить модель с определенным количеством нескольких факторов одновременно, чтобы улучшить качество анализа и глубину краткосрочного прогноза. При этом, определяется воздействие каждого фактора и общее их влияние на зависимую переменную. Алгоритм многофакторного анализа включает такие этапы: проводится сбор, очистка и отбор независимых факторов, влияющих на исследуемую переменную, анализируется первоначальная информация, осуществляется связь между независимыми факторами и результативным индикатором, строится полученное уравнение, реализуется расчет переменных взаимодействия множественного корреляционного анализа, выводится статанализ итоговых результатов, строится прогноз.

Одной из значительных проблем в системе государственного управления представляется внедрение и использование инновационных ИКТ-решений (Koerich et al.2025). Авторы провели интервью и собрали данные по оценке факторов, влияющих на использование цифровых технологий [11]. Так, используя методику контент-анализа были выявлены следующие факторы: социально-политические, развитие информационной инфраструктуры, рост уровня квалификации государственных служащих, качество человеческого капитала, цифровизация госуслуг и др.

Индикаторы линейного уравнения многофакторной регрессии, как правило, проводятся методом наименьших квадратов (МНК):

$$\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \to \min \qquad (3)$$

Для эконометрического моделирования в этой статье были поставлены гипотезы:

- на уровень цифровой трансформации управления экономическим развитием РК наиболее сильное воздействие на современном этапе оказывают - Инвестиции государства и предприятий в информационно-коммуникационные технологии;

- по прогнозам в краткосрочной перспективе номинальный ВВП ежегодно будет расти в коридоре 10–18 процентов за счет внедрения цифровых факторов в Казахстане.

В качестве инструмента используется метод наименьших квадратов (OLS) анализа. Спецификация модели выглядит так:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X1_t + \beta_2 X2_t + \beta_3 X3_t + \beta_4 X4_t + \beta_5 X5_t + \beta_6 X6_t + \epsilon_t \qquad (4)$$

Размер выборки составил 16 лет (2010–2025 гг.). Доверительный интервал прогноза в 5% подтверждает статистическую достоверность полученных расчетов.

$$\hat{Y}_{t+h} \pm t_{\alpha/2} \cdot SE(\hat{Y}) \qquad (5)$$

где:

$t_{\alpha/2}$ - показатель критического распределения критерия Стьюдента,

$SE(\hat{Y})$ - стандартная ошибка прогноза.

Цифровизация государственного управления на основе подхода открытых инноваций играет непосредственную роль в совершенствовании развития корпоративной цифровизации, научных знаний и накоплении информационного

капитала. Так, по мнению китайских ученых (Yang et al.2025) в рамках математического моделирования было обоснованно, что существует прямая связь между цифровыми платформами Правительства, используемыми технологиями и инновационной деятельности предприятий [12].

Для построения и получения результатов эконометрической модели был использован прикладной пакет «Gretl». В данном пакете содержатся готовые встроенные этапы с целью оценки временных рядов. К примеру, в этой программе существует алгоритм анализа индикаторов на основе – «МНК» (т.е. метода наименьших квадратов), метода моментов и т.д. Анализ временных рядов включает – «ARMA» (статистическая модель - авторегрессия скользящего среднего), «ARIMA» (попытка реализовать результат будущего показателя на основе его прошлого состояния - авторегрессия комплексного скользящего среднего), «VAR» векторная авторегрессия и пр.

В качестве информационной базы экономико-математического моделирования были использованы материалы, справки, отчеты и информационные бюллетени - Всемирного Банка, Концепций, национальных проектов и госпрограмм Казахстана, Национального бюро по статистике и пр.

Обсуждение и результаты. По результатам деятельности цифровизации экономики РК, международный аналитический центр «Oxford Insights» сообщает, что наша республика заняла почетное 60-е место среди исследуемых 195 стран в рейтинге «Government AI Readiness Index 2025» [13]. По сравнению с прошлым периодом, рейтинг возрос на 16 мест (ранее 76-я строчка), что демонстрирует достаточное лидерство Казахстана среди государств Центральной Азии в вопросах подготовленности к применению и управлению ИИ в национальной экономике.

В настоящее время использование цифровых технологий в электронном правительстве вызывает огромное внимание к intelligent decision support systems (IDSS) [14]. С целью активизации внедрения цифровых решений в госуправлении ученые Chen et al. (2025). рекомендуют использовать «Integrated AI-based Decision Support System» (IA-DSS-EG) на основе ИИ. Отмеченная система состоит из таких 5 модулей. К ним можно отнести: общая классификация административных функций, прогнозирование налогов на развитие экономики, степень доверия общества, соблюдения правовой совместимости и повышение квалификации госслужащих.

Отметим, рейтинг «Government AI Readiness Index» включает оценку возможностей правительства рационально применять ИИ в экономике, государственном управлении и др. Значительные достижения в рамках отмеченного рейтинга республика показала по разделу «Public Sector Adoption» - 73,59 балла. Такой результат говорит о разносторонних возможностях электронного правительства, цифровизации госуслуг, организации информационных сервисов ИИ для юридических и физических лиц, роста финансирования бизнеса для внедрения цифровых решений.

На основе исследований Казахстан по качественной степени цифрового управления уверенно вошел в 10-ку основных лидеров глобального рейтинга «OS»I (Online Services Index) в 2025 году [15]. В частности, по итогам 2026 года свыше 94% госуслуг предлагаются в электронном формате (рисунок 1).

Из данных рисунка 1 наблюдается постепенный рост зарплаты. При этом существует обратная зависимость между некоторым снижением количества госслужащих и уровнем зарплаты. Так, величина зарплаты возросла со 125000 до 420000 тенге или в 3,4 раза за последние 10 лет. А количество чиновников со 100000 упало до 84000 человек (или на 16000 чел.) с 2016г. до 2025г. Другими словами, оптимизация численности государственных сотрудников привела к учеличению эффективности госаппарата и оплаты труда.

Dei, 2025 сформировал важные профессиональные компетенции госслужащих, которые требуются для работы с электронными технологиями в сфере ИИ [19]. Особо выделяется, что цифровизация системы местного самоуправле-

ния дает возможность применять методику ИИ для принятия перспективных государственных решений.

Считаем, что одним из важных факторов эффективности состава госаппарата и роста зарплаты по результатам оценки деятельности чиновников представляется цифровизация и использование ИИ при принятии государственных решений.

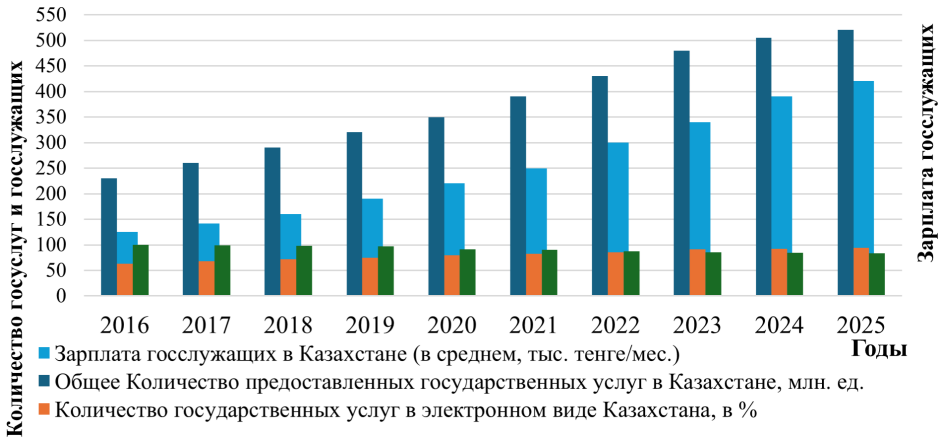


Рис.1 - Состояние развития электронных госуслуг и госслужащих в РК, 2016–2025

Примечание: Составлено на основе источников [16 - 18]

Коррупция представляется серьезной проблемой для обеспечения прозрачности в решении вопросов государственного регулирования экономических процессов. Darusalam et al. (2024) провели качественное исследование в виде интервью с государственными служащими и представителями населения, чтобы вскрыть угрозы автоматизации и цифровизации административных процессов в органах государственной службы [20]. Специалисты установили, что следует внедрять электронные технологии с целью снижения сговора и возможности злоупотребление среди государственных лиц.

В 2025 году пользователям предложены более 1200 цифровых сервисов посредством платформ – «eGov.kz» и «eGov Mobile». При этом объем предоставленных госуслуг в РК составил свыше 520 млн. единиц, рост составляет около 15 млн ед. по сравнению с 2024 годом.

Здесь огромную поддержку указанным платформам оказывает виртуальный помощник - «eGov AI» особенно в части ответов на присланные вопросы о видах, сроках и объемах онлайн-госуслуг. Этот помощник значительно сократил время на ожидание вопросов граждан и перевел ручную работу на -автоматическую в госорганах, а также снизил нагрузку и расходы на работу операторов. Портал «eGov» включает регистрацию услуг предпринимателям, медуслугам, подачи заявлений и др. необходимых документов. Электронный сервис «eGov Mobile» использует элементы «push-уведомлений», процессов биометрической идентификации и пр.

В работе Urhibo et al. (2024) проведена оценка государственных услуг в американской сфере госуправления. Реализованный опрос 146 респондентов выявил, что существует возможность внедрения электронных и цифровых технологий в обеспечении государственных услуг [21]. В этой связи необходимо усиленно вкладывать инвестиции в развитии электронной инфраструктуры, расширения цифровой грамотности среди населения и повышения профессионализма государственных кадров.

В результате идет активный процесс комплексной интеграции ИИ в разные отрасли экономики в: государственное управление, энергетику, АПК, здравоохранение и др.

Значит цифровая модернизация включает не

только сам доступ к электронным услугам и сервисам, но и критерии управления статданными.

Активизация технологической модернизации напрямую связана с созданием стартапов, которые привлекли более 300 млн долл. США венчурных и государственных инвестиций. В частности, крупный местный акелератор «Astana Hub» объединил свыше 1350 стартапов из таких стран: США, Англия, Голландия, ФРГ, Россия и др. (более 30 государств), общий доход равен 1,3 трлн. тенге.

Стоит выделить, что в республике был открыт в 2025 году крупный венчурный фонд «Qazaqstan Venture Group», величина которого составляет 1 млрд. долл. США. Основная деятельность данного фонда ориентирована на финансирование ИИ-стартапов и развитие IT-инфраструктуры.

Цифровая модернизация воздействует также и на рынок труда. Уже зарегистрировано около 18,5 тыс. IT-компаний, где осуществляют трудовую деятельность более 195 тыс. человек. Разработанная и реализуемая программа «Tech Orda» предполагает подготовить к 2029 году 20 тыс. новых IT-специалистов и инженеров ИИ при поддержке государства.

Следовательно, все вышесказанное демонстрирует стратегию мобильной направленности, финансирования, модернизации, управления цифровой системы и стимулирования роста экономики страны в Казахстане.

Для научно-практического исследования влияния цифровых факторов на экономическое развитие Республики Казахстан была реализована множественная корреляция (таблица 1) между номинальным ВВП (*Y*) страны и важными переменными цифровой инфраструктуры (*X1*), инвестиций (*X2*), производительностью человеческого капитала (*X4, X5*) и гражданами, владеющими информационными ресурсами (*X3, X6*).

Таблица 1 – Исходные статданные для построения модели

Годы	Номиналь-ный ВВП РК, Млрд.долл. США	Инвестиции государства в цифровые технологии в РК (млрд .тг)	Инвестиции предприя-тий в цифровые технологии в РК (млрд .тг)	Уровень цифровой грамотно-сти населения РК (%)	Индекс человече-ского капитала РК (0–1)	Производи-тельность труда РК (Информа-ция и связь) (тыс. тг.)	Доля населения, пользующе-гося интернетом (%)
	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6
2 010	148,00	30,00	120,00	62,00	0,77	54 450,00	31,62
2 011	192,00	35,00	150,00	65,00	0,77	45 788,40	50,60
2 012	208,00	40,00	180,00	67,00	0,78	51 083,00	61,90
2 013	236,00	45,00	210,00	69,00	0,79	63 687,80	63,30
2 014	221,00	55,00	240,00	72,00	0,79	61 157,10	63,90
2 015	184,00	60,00	260,00	73,00	0,80	66 712,20	72,90
2 016	137,00	70,00	290,00	74,00	0,80	60 581,00	95,00
2 017	166,00	85,00	350,00	76,00	0,802	68 960,60	94,00
2 018	179,00	100,00	420,00	79,00	0,804	71 981,10	93,00
2 019	181,00	120,00	480,00	82,00	0,810	80 287,30	91,00
2 020	171,00	140,00	550,00	84,00	0,83	90 530,80	89,00

2 021	197,00	160,00	650,00	87,00	0,82	103 061,70	87,00
2 022	225,00	180,00	820,00	88,00	0,83	130 940,80	84,00
2 023	262,00	210,00	980,00	90,00	0,84	136 907,00	82,00
2 024	291,00	250,00	1 150,00	91,00	0,64	151 898,70	79,00
2 025	300,00	320,00	1 250,00	94,00	0,65	103 179,00	76,00
Примечание: Составлено на основе источников 22 - 26							

В нижеприведенной таблице 2 представлены коэффициенты корреляции между зависимой переменной *Y* (номинальный ВВП РК) и различными независимыми индикаторами, а также между самими независимыми факторами.

Таблица 2 - Коэффициенты корреляции

Независимые факторы	***Y***	***X1***	***X2***	***X3***	***X4***	***X5***
X1	0,734					
X2	0,762	0,991				
X3	0,595	0,939	0,939			
X4	-0,611	-0,501	-0,482	-0,240		
X5	0,658	0,851	0,905	0,884	-0,247	
X6	-0,021	0,412	0,404	0,648	0,220	0,408
Примечание: построено на основе программы ***«Gretl»***						

Приведенный множественный анализ показывает, что основными движущими силами увеличения номинального ВВП представляются инвестиции в цифровые технологии и производительность труда. Государственные инвестиции (*X1*) (r = 0,734) и частные инвестиции (*X2*) (r = 0,762) показывают сильную положительную связь с уровнем ВВП. Соответственно, это значительно подтверждает важность как бюджетного, так и предпринимательского финансирования цифровизации экономики РК.

Производительность труда (*X5)* имеет положительную корреляцию (r = 0,658) и демонстрирует связь между показателями инвестиций и экономическим развитием. В то же время степень цифровой грамотности населения (*X3*) показывает достаточно умеренную положительную связь с ВВП (r = 0,595). Это подчеркивает определенное влияние инновационной деятельности граждан на зависимую переменную *(Y)*.

Однако, индекс человеческого капитала (*X4*) имеет отрицательную корреляцию (r = -0,611), что, по нашему мнению, объясняется некоторой временной задержкой его воздействия (т.е. проявится вероятно через длительное время). Доля населения, пользующегося интернетом (*X6*), в настоящее время имеет очень слабую отрицательную корреляцию (r = -0,021). Это говорит о том, что индикатор пока не оказывает значительного влияния на ВВП.

Определим взаимосвязь между зависимой переменной (*Y*) и независимыми переменными (*X1-X6*). В частности, существует почти функциональная взаимосвязь между государственными и частными инвестициями (r = 0,991), что указывает на синхронизацию цифрового развития. Другими словами, здесь синхронизация подразумевает, что данные два фактора одновременно

участвуют в продвижении и управлении цифрового развития экономики РК.

Инвестиции тесно связаны с цифровой грамотностью (r = 0,939), а цифровая грамотность тесно связана с производительностью труда (r = 0,884). Объем производства тесно связан с инвестициями (r = 0,905), что подтверждает характер системы цифровой трансформации. Выделим, что цифровая трансформация в совокупности предполагает процедуру перехода государственных органов власти и внедрение новых информационно-коммуникационных технологий в различные сектора экономики с позиции роста эффективности управления. Вместе с тем происходит перестройка операционной модели государства, введение новых электронных платформ для обоюдовыгодных контактов Правительства с населением и бизнесом, а также создание прозрачности управленческих решений государства на всех уровнях. Значит в стране в рамках цифровой трансформации осуществляются процессы «оцифровки» государственных услуг, при этом государственные органы ориентированы на клиентоориентированность, конкурентоспособность и устойчивость отраслей национальной экономики к изменениям рынка.

Индекс человеческого капитала имеет слабые связи с другими показателями (- 0,247 до -0,220), что указывает на то, что краткосрочное влияние невелико. Этот Индекс (Human Capital Index), в том числе представляет сведения об объёме и качестве образования. В связи с тем, что владение цифровыми навыками трудовых ресурсов еще находится на начальном уровне, то поэтому не видно тесной связи с цифровой трансформацией на уровне экономического развития Казахстана.

Приведенная статмодель была построена методом наименьших квадратов для возможного решения вопросов с наличием автокорреляции и гетероскедастичности. Для оценки значимости коэффициентов использовались показатели «T-Value» и «P-Value» (показывает статистическую значимость переменных, где значимость считается тогда, когда «p-значение меньше 0.05»), а для выявления мультиколлинеарности, чтобы исключать или совместно объединять коррелирующие показатели – Variance Inflation Factor (VIF).

Уравнение регрессии нашей модели выводится по данным таблицы 3. Следовательно, наше уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Y = -229 - 4,62X_1 + 1,103X_2 + 14,15X_3 - 274X_4 - 0,00329X_5 - 2,547X_6 \quad (6)$$

Таблица 3 – Коэффициенты

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-229	263	-0,87	0,408	
X1	-4,62	1,53	-3,01	0,015	498,57
X2	1,103	0,348	3,17	0,011	467,66
X3	14,15	6,46	2,19	0,056	121,73
X4	-274	201	-1,36	0,207	3,83
X5	-0,00329	0,00123	-2,67	0,026	46,96
X6	-2,547	0,942	-2,70	0,024	8,12

Государственные инвестиции в цифровые технологии (*X1*). Отрицательный коэффициент корреляции и хорошая значимость (p = 0,015) могут отражать краткосрочные и небольшие по абсолютной величине экономические расходы на цифровизацию, такие как: перераспределение

бюджетных средств и определенные потери при введении цифровых факторов для создания инфраструктуры.

Инвестиции бизнеса в цифровые технологии (*X2*). Положительное и значительное влияние (p = 0,011) подтвердило хорошую привлекательность частных инвестиций в продвижении и стимулировании экономического роста. Это может характеризовать с более эффективным приобретением инновационной техники и гибким использованием новых технологий.

Цифровая грамотность населения (*X3*). Положительный эффект на уровне 10% значимости указывает на то, что повышение квалификации населения в перспективе будет увеличивать экономический потенциал Казахстана и способствовать увеличению ВВП.

Индекс человеческого капитала (*X4*) Отсутствие статистической значимости (p = 0,207) говорит о том, что в приведенной модели пока определенного позитивного влияния человеческого капитала на темпы и уровень объема ВВП не было установлено, что может быть связано с ограниченными временными рядами.

Производительность труда (*X5*). Отрицательный коэффициент (p = 0,026) могут отражать недостаточные затраты на модернизацию процесса образования и внедрение цифровых технологий.

Доля населения, пользующегося Интернетом (*X6*). Значительное негативное влияние (p = 0,024) указывает на адаптивный эффект, когда доступ к интернет-ресурсам не конвертируется в экономическую отдачу.

В целом результаты показывают, что на современном этапе развития цифровой экономики частные инвестиции в большей степени способствуют экономическому росту, в то время как государственные инвестиции и эффективность инфраструктуры ИКТ пока еще сопровождаются краткосрочными расходами на цифровую адаптацию.

Таблица 4 - Краткое описание полученной модели

S	*R-sq*	*R-sq(adj)*	*R-sq(pred)*
22,7345	86,22%	77,03%	0,00%

Модель демонстрирует достаточно высокую согласованность, объясняя 86,22% изменения увеличения показателя ВВП в зависимости от выбранных цифровых и других социально-экономических факторов (таблица 4).

Скорректированный R^2 (77,03%) показывает, что с учетом количества переменных модель обладает достаточно высокой объясняющей способностью с 6 независимыми факторами.

Низкий R^2 (pred) = 0% демонстрирует то, что модель не оценивает значения ВВП за пределами исходного набора данных (ограниченные временные ряды).

Качество модели: высокий контроль (R^2=86,22%) позволяет сделать вывод о важности выбранных экономических факторов для роста уровня ВВП, в то время как низкий R^2 (pred) указывает на ограниченную предсказательную способность модели за пределами исследуемого периода.

Таким образом, можно сделать вывод, что для повышения эффективности цифровизации в Казахстане необходимо объединить государственные и частные инвестиции, усилить акцент на развитии цифровой грамотности и минимизировать краткосрочные экономические издержки цифровой трансформации.

В таблице 5 приведены результаты дисперсионного анализа (ANOVA) множественной эконометрической модели, направленного на оценку значимости её отдельных компонентов и формирование целостной конфигурации модели.

Таблица 5 - Дисперсионный анализ

Source	*DF*	*Adj SS*	*Adj MS*	*F-Value*	*P-Value*
Regression	6	29100,0	4850,0	9,38	0,002
X1	1	4694,4	4694,4	9,08	0,015
X2	1	5191,6	5191,6	10,04	0,011
X3	1	2481,6	2481,6	4,80	0,056
X4	1	957,0	957,0	1,85	0,207
X5	1	3686,1	3686,1	7,13	0,026
X6	1	3775,7	3775,7	7,31	0,024
Error	9	4651,7	516,9		
Total	15	33751,8			

Общая значимость модели. Значение *F-Value* = 9,38 и *P-Value* = 0,002. Результаты показывают, что регрессионная модель в целом является статистически значимой. Это означает, что выбранные независимые переменные имеют большое значение для объяснения изменений в номинальном ВВП Казахстана. Таким образом, наша модель обладает высокой объяснительной способностью.

Значимость отдельных факторов. Инвестиции государства в цифровые технологии в Казахстане (млрд. тг.) (*X1*). Значение *F-Value*= 9,08 и *P-Value* = 0,015. Это означает, что государственные инвестиции в цифровые технологии оказывают негативное влияние на номинальный ВВП Казахстана. Это может быть связано с краткосрочными затратами, необходимыми для внедрения новых технологий, инфраструктурных проектов и цифровых инициатив. Однако, несмотря на отрицательное значение коэффициента (-4,62), высокая значимость этого фактора подтверждается статистическими тестами.

Инвестиции предприятий в цифровые технологии в Казахстане (млрд. тг.) (*X2*). Таким образом, значение *F-Value* = 10,04 и *P-Value* =0,011. Частные инвестиции в цифровые технологии положительно влияют на номинальный ВВП Казахстана. Положительный коэффициент (1,103) указывает на то, что увеличение частных инвестиций на 1 млрд. тг. может привести к росту ВВП на 1,103 млрд. USD. Это подтверждает важность частных инвестиций в цифровую трансформацию экономики.

Уровень цифровой граммотности населения Казахстан (%) (*X3*) - значение *F-Value* = 4,80 и *P-Value* = 0,056. Если цифровая грамотность оказывает положительное влияние на ВВП, то ее значимость составляет 10%. Это связано с важностью цифрового образования, которое в долгосрочной перспективе может способствовать повышению производительности и инновационного потенциала.

Индекс человеческого капитала (*X4*) - *F-Value* = 1,85 и *P-Value* =0,207. Согласно данной модели, индекс человеческого капитала не оказывает статистически значимого влияния на ВВП. Это может указывать на то, что улучшение человеческого капитала (образование, здравоохранение, навыки) не оказывает прямого влияния на рост ВВП, особенно в краткосрочной перспективе.

Производительность труда (*X5*). *F-Value* = 7,13 и *P-Value* =0,026. Производительность труда в секторе ”информация и связь” оказывает значительное негативное влияние на ВВП Казахстана. Это связано с тем, что повышение производительности в некоторых секторах требует значительных инвестиций в технологии, которые могут не оказывать ощутимого прямого воздействия.

Доля населения, пользующегося интернетом (%) (*X6*) - *F-Value* = 7,31 и *P-Value* =0,024. Процент пользователей Интернета оказывает значительное негативное влияние на ВВП, что может быть связано с длительным процессом адаптации населения к новым цифровым технологиям. Этот фактор может отражать разницу между доступностью и качеством Интернета, что также влияет на экономические последствия.

Качество модели.

Ошибка (*Error*): средняя ошибка модели (среднеквадратичная ошибка) составляет 516,9, что указывает на определенную ошибку прогнозирования, но незначительную с точки зрения общей дисперсии.

Общая вариация (*Total SS*=33751,8) и объясненная вариация (*Regressian SS* =29 100,0) подтверждает высокую подгонку модели с R^2 = 86,22%. Другими словами, изменение номинального ВВП Казахстана на 86% можно объяснить выбранными факторами. Однако показатель R^2 (pred) = 0,00% свидетельствует о том, что модель плохо предсказывает значения ВВП за пределами исследуемого периода.

На основе полученной модели выполнен прогноз номинального ВВП на 2026-2028гг. на основе методики наименьших квадратов (OLS). На основе оцененной модели рассчитывается номинальный прогноз ВВП для трехлетнего периода (таблица 6).

Прогноз показывает стабильную положительную динамику. В соответствии с текущей тенденцией цифровой трансформации экономики, ожидается, что номинальный ВВП вырастет на 18–19% в период с 2026 по 2028 годы. Результирующий путь соответствует сценарию безынерционного экономического развития при сохранении текущих темпов цифровой трансформации Казахстана. Рост ВВП объясняется совокупным влиянием цифровых инвестиций, корпоративных и производственных факторов.

Таблица 6 – Краткосрочный прогноз

Факторы	**2026**	**2027**	**2028**
У	320,26	348,86	379,97
X1	332,79	374,42	418,79
X2	1 422,15	1 600,70	1 791,05
X3	96,05	98,11	100,17
X4	0,67	0,63	0,59
X5	150 620,13	162 034,70	174 042,00
X6	42,11	29,62	15,62

Прогноз показывает устойчивый рост государственных средств на цифровые технологии. Среднегодовой темп роста составляет более 10%, что свидетельствует о стратегическом приоритете цифровизации в государственной политике РК. Увеличение государственных инвестиций создаст инфраструктурную базу для расширения цифровых услуг и модернизации экономического развития.

Частный сектор демонстрирует сопоставимую динамику роста инвестиционных вложений. Увеличение инвестиций отражает рост технологической адаптации предприятий и компаний, а также хорошее укрепление конкурентной среды. Синергетический эффект государственных и частных капиталовложений создает определенный стабильный мультипликативный эффект для национального хозяйства.

Таким образом, согласно данному прогнозу, уровень обеспеченности граждан Казахста-

на цифровыми компетенциями приближается к максимальному. Значения, близкие к 100%, свидетельствуют о высокой степени цифровой интеграции общества. Дальнейшая динамика данного показателя, вероятно, будет носить преимущественно качественный и стабилизационный характер.

Умеренная вариативность индекса человеческого капитала отражает структурные изменения в образовании и социально-экономической среде. Показатель остается в диапазоне, соответствующем уровню устойчивого человеческого развития. Следует иметь в виду, что этот индекс является интегральным и чувствительным к различным макроэкономическим факторам.

Наблюдается устойчивый рост производительности труда, что подтверждает повышение продуктивности цифрового сектора. Увеличение этого показателя является прямым каналом влияния цифровизации на формирование повышенной ценности. Производительность и рост рабочей силы увеличивают вклад информационно-коммуникационного сектора в структуру ВВП.

Динамика показателя доли граждан, использующего интернет, относится к производственным характеристикам моделей временных рядов. В долгосрочной перспективе доступ к Интернету остается на высоком уровне. В рамках модели этот показатель интерпретируется как структурный фактор цифровой трансформации, связанный с экономическим потенциалом за счет расширения цифровых рынков и услуг.

Прогнозная динамика показывает улучшения, связанные с ключевыми цифрами и макроэкономическими показателями. Увеличение инвестиций в цифровые технологии является ресурсной основой для повышения производительности труда. Рост цифровых навыков населения создает благоприятную институциональную среду для расширения цифровой экономики. В целом, эти факторы подтверждают положительную тенденцию повышения номинального ВВП Казахстана в среднесрочной перспективе.

Следовательно, результаты моделирования и прогнозирования подтвердили приведенную гипотезу, где независимые переменные - инвестиции государства и предприятий в электронные и цифровые технологии - оказывают достаточно сильное влияние на степень цифровизации управления национальной экономики Казахстана. Следовательно, эти финальные результаты могут оказать помощь для принятия своевременных и обоснованных решений государства в ближайшей перспективе.

Выводы. Реализация эконометрического моделирования за период 2010–2025 годов показала, что в общем, на экономический рост оказывает влияние рост инвестиций в цифровые технологии и повышение производительности труда в Казахстане. Вместе с тем цифровая грамотность непосредственно усиливает это воздействие, а показатели распространения интернета и уровень человеческого капитала оказывают менее выраженное краткосрочное влияние.

Bella, Santoro (2025) справедливо утверждают, что необходимо усиленно развивать внедрение электронных государственных услуг [27]. Проведённый анализ показал, что необходимо осуществить трансформацию органов власти с позиции усиления использования цифровых технологий и повышения квалификации государственных служащих.

В июне 2025 г. для приоритетного развития свыше 400 госуслуг инвестиционным проектам был введен новый Механизм «Зеленого коридора» на базе информационного портала «Е-лицензирование». Данный механизм применяется при сотрудничестве инвесторов с государственными органами в достаточно ускоренные сроки на уровне «одного окна».

Такая процедура предоставляет возможность оперативно сопровождать заявки на инвестиционные проекты в рамках использования цифровых государственных сервисов на основе НЦИП (Национальной цифровой инвестиционной платформы). Такая практика стимулирует организацию гарантированного и последовательного порядка рассмотрения инвестиционных проектов на базе оказания государственных услуг.

С помощью пространственно-временных индикаторов Bobro et al. (2025) установили главные векторы инновационного развития процесса управления Европы на основе ИКТ [28]. Здесь особый акцент авторы сделали на предоставлении качественных государственных услуг. В результате было определено, что инструменты искусственного интеллекта способствуют продвижению роста эффективности государственного управления.

Проведенный анализ показал, что уровень цифровой граммотности казахстанского населения с 2010 года до 2025 года возрос с 62% до 94%. В настоящее время электронная платформа «eOtinish» - стала важным подходом на уровне цифрового взаимодействия граждан с государством. К примеру, если в 2022 году количество обращений населения составляло 1.8 млн. единиц, то по результатам 2025 года – более 5 млн. ед. (рост почти за 4 года составил в 2,8 раза). В Казахстане платформа «eOtinish» была введена летом 2022г., где внедрена автоматизированная процедура подачи, отбора и мониторинга обращений, что позволяет пользователям оперативно отслеживать статус обращений и заявлений в государственные органы в онлайн режиме, что соответствует использованию на практике принципов «Слышащего государства». Это свидетельствует о том, что платформа «eOtinish» оказывает положительное влияние и способствует развитию прозрачного, доверительного и результативного взаимодействия государства с гражданами Казахстана в цифровой среде.

Вместе с тем, в ближайшей перспективе созданы предпосылки для внедрения методов ИИ и ускорения процессов взаимодействия госорганов с населением в мобильных приложениях и цифровых порталах.

В Казахстане с 2025 года стартовала программа по обучению 50.000 госслужащих по работе с новыми информационными программами с применением ИИ. Следует отметить, что для продвижения «IT-стартапов», роста профессионализма и борьбы с коррупцией в системе государственной службы активизированы мероприятия по повышению квалификации государственных работников в области приобретения навыков по ИИ. По данным Министерства ИИ и цифрового развития на 1-ый квартал 2026 года свыше 3000 госслужащих уже успешно прошли обучение по обретению профессиональных навыков в работе с инструментами ИИ.

Итальянскими авторами (Todisco et al., 2025) был разработан и реализован опрос в онлайн формате среди 42 государственных работников, чтобы оценить как метод «anticipatory governance» (AG) воздействует на их уровень инновационного развития [29]. Здесь было обоснованно, что методика «anticipatory governance» (AG) включает владение госслужащими цифровыми навыками, которые стимулируют принятие объективных и справедливых упреждающих государственных решений.

Становление архитектуры ИИ уже начало позитивно воздействовать на деятельность определенных отраслей. В частности, в секторе энергетики применение методики ИИ помогает воздействовать на увеличение энергоэффективности и перераспределения энергомощностей в пиковые часы.

Определенная поддержка использования подходов ИИ происходит в сфере транспорта и логистики, что привело к возрастанию на 10 процентов количества грузоперевозок, снижения логистических расходов до 20% в 2025 году.

Например, казахстанский проект «Социальный кошелек» включил около 7000 образовательных школ и 49 млн обедов на бесплатной основе. Это дало возможность снизить расходы и сэкономить средства бюджета до 30%. В государственных аптеках внедрение цифровизации и ИИ-инструментов включило 13 млн. электронных лекарственных рецептов.

Однако, в республике еще имеются значительные угрозы и барьеры развития цифровой трансформации: низкий уровень доступа интернета и развитости информационной инфраструктуры в отдельных районах и сельской местности.

Несмотря на запуск 2-х суперкомпьютеров в Казахстане, наблюдается серьезный разрыв с международными ведущими IT-компаниям. Так,

у международных IT-гигантов производительный потенциал составляет несколько миллионов видеокарт, что позволяет им располагать высокими мощностями. В нашей стране таких значительных технологических ресурсов недостаточно еще!

Очевидно, что информационная база государственных услуг требует еще доработки, существуют еще перебои в деятельности электронных платформ в ЦОНах.

Внедрение ИИ имеет сегодня еще такие ограничения, как: высокая цена приобретения инновационного оборудования, довольно большая стоимость вычислений, низкая степень развития «5G сетей», определенная и слабая доступность «Graphics Processing Unit» (GPU – то есть - это главный вычислительный чип видеокарты) из-за дорогих издержек для предпринимательских структур.

Статья Bastykov et al. (2024) посвящена реформам в системе государственного регулирования экономики. Здесь были охарактеризованы основные направления по осуществлению этапов и рекомендаций по стимулированию развития электронного правительства [30].

Поэтому с целью совершенствования и продвижения системы ИИ и внедрения ИКТ в государственном регулировании экономики РК предлагаются *такие предложения*.

Госорганам следует постоянно мониторить персональную ответственность пользователей ИИ-систем, чтобы поддерживать безопасность.

Использовать риск-ориентированный подход при сборе и анализе статданных на основе инновационных технологий.

Расширять приток инвестиций в технологическое развитие ключевых секторов экономики, как со стороны Правительства, так и бизнеса.

Увеличивать производственную мощность информационной и сетевой инфраструктуры ИИ от киберугроз, разного рода вирусов и пр.

Создавать мощные дата-центры для размещения серверного оборудования, деятельности интернет-сервисов и облачных платформ, хранения крупных баз данных с позиции достижения экономической безопасности, обеспечения высокоскоростными интернет-каналами, оптимального управления в госорганах, эффективного использования производственных процессов для бизнес-структур и скорости обработки данных населения.

В целом, с 2025 г. ИИ стал основным инструментом при принятии государственных решений в экономике на базе введения «Национальной платформы ИИ». Посредством данной платформы все госорганы имеют доступ ко всем имеющимся вычислительным средствам, электронным сервисам, единым статданным, подходам, IT-проектам и моделям.

Таким образом, принятие соответствующих нормативных документов по ИКТ и ИИ, создание сети новых цифровых платформ, расширение инвестиций государства и предприятий в ИИ, активизация проникновения интернета, повышение квалификации госслужащих, достаточно развитая экосистема государственных электронных услуг - представляют благоприятную основу для осуществления перспектив цифровой трансформации, внедрения инструментов ИИ, работу дата-центров в управлении и достижении устойчивого экономического развития Казахстана.

Литература

1. Guterres, A. From India, Guterres calls for $3 billion fund to ensure AI benefits all. - United Nations, 2026. URL: https://news.un.org/en/story/2026/02/1166996.- Дата обращения: 22.02.2026.

2. Замедление роста, цифровизация и тарифы: что ждет мировую торговлю в 2026 году? Новости ООН. Глобальный взгляд Человеческие судьбы, 2026. URL: https://news.un.org/ru/story/2026/01/1467186.- Дата обращения: 28.01.2026.

3. Sigurjonsson, O., Jónsson, E., Gudmundsdottir, S. Sustainability of Digital Initiatives in Public Services in Digital Transformation of Local Government: Insights and Implications // Sustainability. - 2024. - Vol.16(24):10827. DOI 10.3390/su162410827.

4. Digital 2026 Global Overview Report / 2025. URL: https://wearesocial.com/us/blog/2025/10/digital-2026-global-overview-report/ .-Дата обращения: 23.01.2026.

5. Smagulova Sh., Bastykov D., Omarova A., Omarova B. The evolution and development of public administration digitalization: an international bibliometric analysis // Cogent Social Sciences. - 2025. - Vol.11(1): 2548018. DOI 10.1080/23311886.2025.2548018.

6. Цифровой Кодекс РК / Кодекс РК от 9 января 2026 г. - № 255-VIII ЗРК. – Астана: АкОрда, 2026. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2600000255.- Дата обращения: 19.01.2026.

7. Об искусственном интеллекте / Закон РК от 17 ноября 2025 г. - № 230-VIII ЗРК. - Астана: АкОрда, 2025. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z2500000230.- Дата обращения: 20.02.2026.

8. Концепция развития искусственного интеллекта на 2024–2029 гг. / Постановление Правительства РК от 24 июля 2024 г. - № 592. – Астана: АкОрда, 2024. URL: https://continent-online.com/Document/?doc_id=34317430.- Дата обращения 25.02.2026.

9. Tutar H. Algorithmic Interaction in Public Administration: Data-Based Communication and Political Participation in Public Institutions // Public Governance, Administration and Finances Law Review. - 2025. - Vol.10 (2). - P.157-184. DOI 10.53116/pgaflr.8460.

10. Borriello G. The grand challenge of public administration digitalization: The digital identity policy in Italy // International Review of Administrative Sciences.-2025. - Vol.2. P.281-319. DOI 10.1177/00208523251333541.

11. Koerich A.B., Mussi C.C., Salgueirinho J.B., Guerra O.A., Casagrande J.L. Critical Factors in the Implementation of Innovation: A Case Study of a Brazilian Public Organization // The Electronic Journal of Information Systems in Developing Countries. - 2025. - Vol.4. - P.1-15. DOI 10.1002/isd2.70018.

12. Yang D., Jun X., Xiao Y. How public digital governance system affects firms' digital technology innovation performance: Base on open innovation perspective // Technology in Society.- 2025. - Vol.83: 103001. DOI 10.1016/j.techsoc.2025.103001.

13. Казахстан лидирует по готовности к внедрению искусственного интеллекта среди стран Центральной Азии / Министерство искусственного интеллекта и цифрового развития. - Астана, 2025. URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/maidd/press/ news/details/1131135?lang=ru. -Дата обращения 10.01.2026.

14. Chen J., Lou Z., Chen G., Zhang C., Li Y. Research on the Application of AI-Based Intelligent Decision Support Systems in E-Government Services // Journal of Organizational and End User Computing.-2025. - Vol.37(1). - P.1-25. DOI 10.4018/JOEUC.392618.

15. Казахстан вошел в топ-10 в мире по уровню развития цифровых услуг / Международное информационное агентство «Казинформ», 2025. URL: https://www.inform.kz/ru/kazahstan-voshel-v-top-10-v-mire-po-urovnyu-razvitiya-tsifrovih-uslug-f606f5 . - Дата обращения 08.01.2026.

16. Statistics of services rendered / Portal «egov». – Astana, 2026. URL: https://egov.kz/cms/en/information/about/stat.- Дата обращения: 20.01.2026.

17. Национальный доклад о состоянии государственной службы. – Астана, 2025. URL: file:///C:/Users/777/Downloads/_gluster_2025_4_10_105485a81d162de727bef20a077e631f_original.628447.pdf .- Дата обращения: 30.12.2025.

18. Wages in the Republic of Kazakhstan / Agency for Strategic Planning and Reforms of the RK. Bureau of National Statistics. – Astana, 2026. URL: https://stat.gov.kz/en/industries/labor-and-income/stat-wags/publications/184222/?utm_source=chatgpt.com .- Дата обращения: 20.02.2026.

19. Dei, H. The use of AI in the organization of local government work // LatIA. -2025. - Vol.3. - P.123-133. DOI 10.62486/latia2025123.

20. Darusalam D., Janssen M., Jayanti S., Sitompul R. Public administration digitalization effects on corruption: Lesson learned from Indonesia // Digital Government: Research and Practice.- 2024. - Vol.5(4). - P.1-13. DOI 10.1145/3691351.

21. Urhibo B., Aruoren E., Ivwighren H., Imene O. Digital Communication Technologies in Public Administration: A Study of Ministry of Basic and Secondary Education, Delta State// Journal of Ecohumanism.- 2024. - Vol.3(7). - P.319–328. DOI 10.62754/joe. v3i7.4203.

22. GDP (current US$) / World Bank. – Washington DC, 2025. URL: https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=KZ&utm_source=chatgpt.com.- Дата обращения: 20.01.2026.

23. State program ”Digital Kazakhstan” / Order of the Government of the Republic of Kazakhstan. - Astana, 2017. URL: https://cis-legislation.com/document.fwx?rgn=102961 &utm_source=chatgpt.com. -Accessed on 30.12.2025.

24. Об утверждении Концепции цифровой трансформации, развития отрасли информационно-коммуникационных технологий и кибербезопасности на 2023–2029 годы/Постановление Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 года № 269. – Астана: Акорда, 2023. URL: https://stat.gov.kz/en/industries/labor-and-income/stat-wags/publications/184222/?utm_source=chatgpt.com.- Дата обращения 01.15.2026.

25. Artificial Intelligence Is the New Literacy: Kazakhstan Prepares Its People for a Digital Future / DKN. World news. - Astana, 2026. URL: https://dknews.kz/en/articles-in-english/380871-artificial-intelligence-is-the-new-literacy?utm_source=chatgpt.com.-Дата обращения: 09.01.2026.

26. Kazakhstan internet users / Trendonify. – Astana, 2025. URL: https://trendonify.com/kazakhstan/internet-users?utm_source=chatgpt.com.- Дата обращения: 05.01.2026.

27. Bella M., Santoro P. The Modernization of Public Administration: The Impact of Public Employment on Digital Innovation in Italy // International Journal of Public Administration Volume. - 2025. - Vol.48(4). - P.250-262. DOI 10.1080/01900692.2024.2346784.

28. Bobro N., Bielikov V., Matveyeva M., Salamakha A., Kharchun, V. Innovations in public administration and management for implementing effective strategies and tools // Salud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias. -2025. - Vol.4. -P.1-9. DOI 10.56294/sctconf20251483.

29. Todisco L., Mangia G., Canonico P., Langella F. Foreseeing the future: anticipatory governance as a response to the technological and managerial challenges in the public sector // International Journal of Public Sector Management.-2025. - Vol.3. - P.1-17. DOI 10.1108/IJPSM-03-2025-0109.

30. Bastykov, D., Smagulova, Sh., Karatayev, M., Togizbaeva, M. Bibliometric analysis of research on public administration reform // Journal of Economic Research &Amp; Business Administration. - 2024. - Vol.149(3). - P.136-149. DOI 10.26577/be.2024-149-i3-010.

References

1. Guterres, A. From India, Guterres calls for $3 billion fund to ensure AI benefits all. - United Nations,

2026. URL: https://news.un.org/en/story/2026/02/1166996.- Accessed on 22.02.2026.

2. Zamedlenie rosta, cifrovizacija i tarify: chto zhdet mirovuju torgovlju v 2026 godu? Novosti OON. Global' nyj vzgljad Chelovecheskie sud' by, 2026. URL: https://news.un.org/ru/story/2026/01/1467186.- Data obrashhenija: 28.01.2026. [in Russian]

3. Sigurjonsson, O., Jónsson, E., Gudmundsdottir, S. Sustainability of Digital Initiatives in Public Services in Digital Transformation of Local Government: Insights and Implications // Sustainability. - 2024. - Vol.16(24):10827. DOI 10.3390/su162410827.

4. Digital 2026 Global Overview Report / 2025. URL: https://wearesocial.com/us/blog/2025/10/digital-2026-global-overview-report/- Accessed on 23.01.2026.

5. Smagulova Sh., Bastykov D., Omarova A., Omarova B. The evolution and development of public administration digitalization: an international bibliometric analysis // Cogent Social Sciences. - 2025. - Vol.11(1): 2548018. DOI 10.1080/23311886.2025.2548018.

6. Cifrovoj Kodeks RK / Kodeks RK ot 9 janvarja 2026 g. - № 255-VIII ZRK. – Astana: AkOrda, 2026. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2600000255.- Data obrashhenija: 19.01.2026. [in Russian]

7. Ob iskusstvennom intellekte / Zakon RK ot 17 nojabrja 2025 g. - № 230-VIII ZRK. - Astana: AkOrda, 2025. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z2500000230.- Data obrashhenija: 20.02.2026. [in Russian]

8. Koncepcija razvitija iskusstvennogo intellekta na 2024–2029 gg. / Postanovlenie Pravitel' stva RK ot 24 ijulja 2024 g. - № 592. – Astana: AkOrda, 2024. URL: https://continent-online.com/Document/?doc_id=34317430.- Data obrashhenija 25.02.2026. [in Russian]

9. Tutar H. Algorithmic Interaction in Public Administration: Data-Based Communication and Political Participation in Public Institutions // Public Governance, Administration and Finances Law Review. - 2025. - Vol.10 (2). - P.157-184. DOI 10.53116/pgaflr.8460.

10. Borriello G. The grand challenge of public administration digitalization: The digital identity policy in Italy // International Review of Administrative Sciences.-2025. - Vol.2. P.281-319. DOI 10.1177/00208523251333541.

11. Koerich A.B., Mussi C.C., Salgueirinho J.B., Guerra O.A., Casagrande J.L. Critical Factors in the Implementation of Innovation: A Case Study of a Brazilian Public Organization // The Electronic Journal of Information Systems in Developing Countries. - 2025. - Vol.4. - P.1-15. DOI 10.1002/isd2.70018.

12. Yang D., Jun X., Xiao Y. How public digital governance system affects firms' digital technology innovation performance: Base on open innovation perspective // Technology in Society.- 2025. - Vol.83: 103001. DOI 10.1016/j.techsoc.2025.103001.

13. Kazahstan lidiruet po gotovnosti k vnedreniju iskusstvennogo intellekta sredi stran Central' noj Azii / Ministerstvo iskusstvennogo intellekta i cifrovogo razvitija. - Astana, 2025. URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/maidd/press/ news/details/1131135?lang=ru. -Data obrashhenija 10.01.2026.

14. Chen J., Lou Z., Chen G., Zhang C., Li Y. Research on the Application of AI-Based Intelligent Decision Support Systems in E-Government Services // Journal of Organizational and End User Computing.-2025. - Vol.37(1). - P.1-25. DOI 10.4018/JOEUC.392618.

15. Kazahstan voshel v top 10 v mire po urovnju razvitija cifrovyh uslug / Mezhdunarodnoe informacionnoe agentstvo «Kazinform», 2025. URL: https://www.inform.kz/ru/kazahstan-voshel-v-top-10-v-mire-po-urovnyu-razvitiya-tsifrovih-uslug-f606f5. - Data obrashhenija 08.01.2026. [in Russian]

16. Statistics of services rendered / Portal «egov». – Astana, 2026. URL: https://egov.kz/cms/en/information/about/stat.- Accessed on 20.01.2026.

17. Nacional’ nyj doklad o sostojanii gosudarstvennoj sluzhby. – Astana, 2025. URL: _gluster_2025_4_10_105485a81d162de727bef20a077e631f_original.628447.pdf .- Data obrashhenija: 30.12.2025.

18. Wages in the Republic of Kazakhstan / Agency for Strategic Planning and Reforms of the RK. Bureau of National Statistics. – Astana, 2026. URL: https://stat.gov.kz/en/industries/labor-and-income/stat-wags/publications/184222/?utm_source=chatgpt.com.- Accessed on 20.02.2026.

19. Dei, H. The use of AI in the organization of local government work // LatIA. -2025. - Vol.3. - P.123-133. DOI 10.62486/latia2025123.

20. Darusalam D., Janssen M., Jayanti S., Sitompul R. Public administration digitalization effects on corruption: Lesson learned from Indonesia // Digital Government: Research and Practice.- 2024. - Vol.5(4). - P.1-13. DOI 10.1145/3691351.

21. Urhibo B., Aruoren E., Ivwighren H., Imene O. Digital Communication Technologies in Public Administration: A Study of Ministry of Basic and Secondary Education, Delta State// Journal of Ecohumanism.- 2024. - Vol.3(7). - P.319–328. DOI 10.62754/joe. v3i7.4203.

22. GDP (current US$) / World Bank. – Washington DC, 2025. URL: https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=KZ&utm_source=chatgpt.com.- Accessed on 20.01.2026.

23. State program ”Digital Kazakhstan” / Order of the Government of the Republic of Kazakhstan. - Astana, 2017. URL: https://cis-legislation.com/document.fwx?rgn=102961 &utm_source=chatgpt.com. - Accessed on 30.12.2025

24. Ob utverzhdenii Koncepcii cifrovoj transformacii, razvitija otrasli informacionno-kommunikacionnyh tehnologij i kiberbezopasnosti na 2023–2029 gody/Postanovlenie Pravitel’ stva Respubliki Kazahstan ot 28 marta 2023 goda № 269. – Astana: Akorda, 2023. URL: https://stat.gov.kz/en/industries/labor-and-income/stat-wags/publications/184222/?utm_source=chatgpt.com.-Data obrashhenija 01.15.2026.

25. Artificial Intelligence Is the New Literacy: Kazakhstan Prepares Its People for a Digital Future / DKN. World news. - Astana, 2026. URL: https://dknews.kz/en/articles-in-english/380871-artificial-intelligence-is-the-new-literacy?utm_source=chatgpt.com.- Accessed on 09.01.2026.

26. Kazakhstan internet users / Trendonify. – Astana, 2025. URL: https://trendonify.com/kazakhstan/internet-users?utm_source=chatgpt.com.- Accessed on 05.01.2026.

27. Bella M., Santoro P. The Modernization of Public Administration: The Impact of Public Employment on Digital Innovation in Italy // International Journal of Public Administration Volume. - 2025. - Vol.48(4). - P. 250-262. DOI 10.1080/01900692.2024.2346784.

28. Bobro N., Bielikov V., Matveyeva M., Salamakha A., Kharchun, V. Innovations in public administration and management for implementing effective strategies and tools // Salud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias. -2025. - Vol.4. -P.1-9. DOI 10.56294/sctconf20251483.

29. Todisco L., Mangia G., Canonico P., Langella F. Foreseeing the future: anticipatory governance as a response to the technological and managerial challenges in the public sector // International Journal of Public Sector Management.-2025. - Vol.3. - P.1-17. DOI 10.1108/IJPSM-03-2025-0109.

30. Bastykov, D., Smagulova, Sh., Karatayev, M., Togizbaeva, M. Bibliometric analysis of research on public administration reform // Journal of Economic Research &Amp; Business Administration. - 2024. - Vol.149(3). - P.136-149. DOI 10.26577/be.2024-149-i3-010

Сведения об авторах

Смагулова Ш.А. - доктор экономических наук, профессор, Университет Международного Бизнеса им. Кенжегали Сагадиева, Алматы, Казахстан, e-mail: shsmagulova@mail.ru;

Кажимуратова С.З. - докторант PhD, НАО Университет Нархоз, Алматы, Казахстан, e-mail: saltanat.kazhimuratova@narxoz.kz;

Койшинова Г.К. - кандидат экономических наук, ассоциированный профессор, ВКУ им. С.Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: gaini_1964@ mail.ru;

Жетписбаева А.А. - старший преподаватель, Казахский Национальный педагогический университета им. Абая, Алматы, Казахстан, e-mail: zhetpisbayeva.asem@inbox.ru;

Жакупова С.Т. - кандидат экономических наук, доцент, Университет Международного Бизнеса им. Кенжегали Сагадиева, Алматы, Казахстан, e-mail: Saltanat.zhakupova.69@gmail.ru;

Ахметова М.Д. - магистр экономических наук, Университет Нархоз, Алматы, Казахстан, e-mail: kz1985@mail.ru;

Information about the authors

Smagulova Sh. - Doctor of Economics, Professor, Kenzhegali Sagadiyev University of International Business, Almaty, Kazakhstan, e-mail: shsmagulova@mail.ru;

Kazhimuratova S.- PhD student ,Narxoz University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: saltanat.kazhimuratova@narxoz.kz;

Koishinova G.K.- PhD in Economics, Associate Professor, S. Amanzholov East Kazakhstan University,

Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: gaini_1964@mail.ru;

Zhetpisbayeva A. - Senior Lecturer, Abay Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhetpisbayeva.asem@ibbox.ru;

Zhakupova S. - Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Kenzhegali Sagadiyev University of International Business, Almaty, Kazakhstan, e-mail: Saltanat.zhakupova.69@gmail.ru.

Akhmetova M. master of economic science, Narxoz University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: kz1985@mail.ru.

ҒТАРМ 06.35.31 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1437**

ЖАСЫЛ ЭКОНОМИКА: ESG ҚАҒИДАТТАРЫНА СҮЙЕНГЕН ЖАСЫЛ ОБЛИГАЦИЯЛАР, ЖАСЫЛ НЕСИЕЛЕР ЖӘНЕ ИНВЕСТИЦИЯЛАР

Қ.Қ. Мамутова, Ж.С. Машраб, А.Н. Айтымбетова

М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

Корреспондент-автор: zmashrab@bk.ru

Мақалада Қазақстанның жасыл экономикаға көшуі аясында ESG қағидаттарына негізделген жасыл қаржыландыру құралдарының (жасыл облигациялар, жасыл несиелер, әлеуметтік және ESG-облигациялар, жасыл инвестициялық қорлар, жасыл микрокредиттер) рөлі мен даму келешегі қарастырылады. Зерттеудің мақсаты-Қазақстан жағдайында жасыл облигациялар мен жасыл несиелердің теориялық-әдіснамалық негіздерін айқындау, олардың жасыл экономиканы және тұрақты дамуды қамтамасыз етудегі ықпалын талдау және осы құралдарды дамыту бойынша институционалдық ұсыныстар ұсыну. Материалдық база ретінде ғылыми әдебиеттер, ұлттық нормативтік-құқықтық және стратегиялық құжаттар, халықаралық және қазақстандық статистикалық деректер, эмитенттердің ашық ESG-есептілігі пайдаланылды. Әдіснамалық тұрғыдан жүйелік және институционалдық тәсілдер, контент-талдау, салыстырмалы және статистикалық талдау, құрылымдық-логикалық модельдеу әдістері қолданылды.

Зерттеу нәтижесінде ESG өлшемдері мен қаржылық табиғатын ескеретін жасыл қаржылық құралдардың матрицалық жіктемесі ұсынылды; әлемдік және қазақстандық жасыл/ESG-облигациялар нарығының динамикасы сипатталып, жасыл құралдардың корпоративтік облигациялар нарығындағы үлесінің әлі де төмен екені, бірақ өсім қарқынының жоғары екені анықталды. Жаңартылатын энергетика, энергия тиімділігі, коммуналдық инфрақұрылым, көлік, су ресурстары және агросектор жасыл қаржыландырудың басым бағыттары ретінде айқындалып, МЖӘ жобаларының қаржыландыру құрылымында жасыл компоненттің әлеуеті көрсетілді. Верификация, ESG-есептілік стандарттары және гринвошинг тәуекелдерімен байланысты институционалдық шектеулер айқындалды. Авторлық қорытындылар жасыл қаржыландыруды ұлттық тұрақты даму стратегияларымен, декарбонизация мақсаттарымен және жауапты инвестиция мәдениетімен терең интеграциялау қажеттігін негіздейді және болашақта эконометрикалық және эмпириялық зерттеулерге әдіснамалық база бола алады.

Түйін сөздер: эмитент, тұрақты даму, әлеуметтік облигациялар, гринвошинг, жасыл өнімдер, жасыл жобалар, жасыл қаржыландыру қоры

ЗЕЛЕНАЯ ЭКОНОМИКА: ЗЕЛЕНЫЕ ОБЛИГАЦИИ, ЗЕЛЕНЫЕ КРЕДИТЫ И ИНВЕСТИЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ESG

К.К. Мамутова, Ж.С. Машраб, А.Н. Айтымбетова

Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
e-mail: zmashrab@bk.ru

В статье рассматривается роль и перспективы развития инструментов «зеленого» финансирования, основанных на принципах ESG (зеленые облигации, зеленые кредиты, социальные и ESG-облигации, зеленые инвестиционные фонды, зеленые микрокредиты) в контексте перехода Казахстана к зеленой экономике. Цель исследования - выявление теоретических и методологических основ зеленых облигаций и зеленых кредитов в контексте Казахстана, анализ их влияния на обеспечение зеленой экономики и устойчивого развития, а также предоставление институциональных рекомендаций по развитию этих инструментов. Материальная база включала научную

литературу, национальные нормативно-правовые и стратегические документы, международные и казахстанские статистические данные, а также открытую ESG-отчетность эмитентов. С методологической точки зрения использовались системно-институциональный подход, контент-анализ, сравнительно-статистический анализ и методы структурно-логического моделирования.

В исследовании представлена матричная классификация «зеленых» финансовых инструментов, учитывающая ESG-факторы и финансовую природу; описана динамика мирового и казахстанского рынков «зеленых»/ESG-облигаций, и установлено, что доля «зеленых» инструментов на рынке корпоративных облигаций остается низкой, но темпы роста высоки. В качестве приоритетных областей «зеленого» финансирования были определены возобновляемая энергия, энергоэффективность, муниципальная инфраструктура, транспорт, водные ресурсы и агропромышленный сектор, а также продемонстрирован потенциал «зеленой» составляющей в структуре финансирования проектов ГЧП. Выявлены институциональные ограничения, связанные с верификацией, стандартами отчетности по ESG и рисками «зеленого отмывания». Выводы автора обосновывают необходимость глубокой интеграции «зеленого» финансирования в национальные стратегии устойчивого развития, цели декарбонизации и культуру ответственного инвестирования, и могут служить методологической основой для будущих эконометрических и эмпирических исследований.

Ключевые слова: эмитент, устойчивое развитие, социальные облигации, гринвошинг, экологически чистая продукция, экологические проекты, фонд зеленого финансирования

GREEN ECONOMY: GREEN BONDS, GREEN LOANS, AND ESG-BASED INVESTMENTS

K.K. Mamutova, Zh.S. Mashrab✉, A.N. Aitymbetova

M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan,
e-mail: zmashrab@bk.ru

This article examines the role and development prospects of green financing instruments based on ESG principles (green bonds, green loans, social and ESG bonds, green investment funds, and green microloans) in the context of Kazakhstan' s transition to a green economy. The aim of the study was to identify the theoretical and methodological foundations of green bonds and green loans in the context of Kazakhstan, analyze their impact on ensuring a green economy and sustainable development, and provide institutional recommendations for the development of these instruments. The material base included scientific literature, national regulatory and strategic documents, international and Kazakhstani statistical data, and issuers' public ESG reporting. From a methodological perspective, a systems-institutional approach, content analysis, comparative statistical analysis, and structural-logical modeling methods were used.

The study presents a matrix classification of green financial instruments, taking into account ESG factors and their financial nature. It describes the dynamics of the global and Kazakhstani green/ESG bond markets, and establishes that the share of green instruments in the corporate bond market remains low, but growth rates are high. Renewable energy, energy efficiency, municipal infrastructure, transport, water resources, and the agro-industrial sector were identified as priority areas for green financing, and the potential of the green component in the structure of PPP project financing was demonstrated. Institutional constraints related to verification, ESG reporting standards, and greenwashing risks were identified. The author' s conclusions substantiate the need for deep integration of green finance into national sustainable development strategies, decarbonization goals, and a culture of responsible investment, and can serve as a methodological basis for future econometric and empirical research.

Keywords: issuer, sustainable development, social bonds, greenwashing, environmentally friendly products, environmental projects, green finance fund

Кіріспе. XXI ғасыр жағдайында климаттың өзгеруі, табиғи ресурстар қорының азаюы және жаһандық экологиялық тәуекелдердің күшеюі әлемдік шаруашылықты дәстүрлі индустриялық үлгіден жасыл экономикаға бет бұруға мәжбүрлеуде. Жасыл экономика экономикалық өсуді қоршаған ортаға түсетін жүктемені төмендетумен, ресурстарды ұқыпты пайдаланумен және әлеуметтік теңдік қағидаттарымен ұштастыруға бағытталған. Осындай жағдайда қаржы жүйесінің жаңаруы – жасыл облигациялар, жасыл несиелер, сондай-ақ әлеуметтік және ESG облигациялары сияқты қаржы құралдарының кеңеюі тұрақты даму мақсаттарына жетудің маңызды тетіктерінің біріне айналып отыр [1].

Қазақстанда да жасыл қаржыландыру нарығы қалыптасу кезеңінен өтіп, АХҚО, Astana International Exchange (AIX), AIFC Green Finance Centre, «Даму» қоры, Қазақстан Даму Банкі сияқты институттардың қатысуымен жасыл облигациялар мен жасыл несиелерді орналастыру тәжірибесі біртіндеп кеңейіп келеді. AIX биржалық алаңында алғашқы жасыл облигациялар 2020 жылдан бастап тіркеліп, жаңартылатын энергия көздері, энергия тиімділігі және өзге де экологиялық сипаттағы бастамаларды қаржыландыруға бағытталды [2, 3]. Мұндай бағыт Қазақстанның төмен көміртекті даму жолын таңдауы және ESG қағидаттарын кезең-кезеңімен ұлттық қаржы жүйесіне енгізу ниетімен үйлеседі.

Сонымен бірге жасыл қаржылық өнімдерге деген сұраныстың өсуі бірқатар ішкі қайшылықтарды да айқын көрсетіп отыр. Бір жағынан, жасыл облигациялар мен несиелер эмитенттерге капиталдың қосымша көздерін ашып, инвесторларға тәуекелі мен кірістілігі салыстырмалы түрде теңгерілген ұзақ мерзімді жобаларға инвестиция салуға мүмкіндік береді. Екінші жағынан, нарықта гринвошинг қатері, жобалардың «жасыл» мәртебесін айқындайтын өлшемдердің бірізді еместігі, верификация рәсімдері мен ESG-есептіліктің жеткілікті деңгейде қалыптаспауы байқалады. Осыған байланысты жасыл облигациялар, жасыл несиелер және ESG-инвестициялар саласындағы ұлттық және халықаралық тәжірибені ғылыми негізде жүйелеу, олардың Қазақстанның тұрақты дамуына қосатын үлесін талдау және институционалдық шектеулерді анықтау ерекше маңызға ие болып отыр.

Осыған орай зерттеу тақырыбын айқындаудың негізі жасыл экономикаға көшу жағдайында қаржы нарығында пайда болған «жасыл» және ESG-бағдарланған жаңа құралдардың рөлі теориялық және эмпирикалық тұрғыдан әлі жеткілікті ашылмағанымен, сондай-ақ Қазақстанда жасыл облигациялар мен жасыл несиелер нарығының әлі де қалыптасу сатысында, салыстырмалы түрде жаңа құбылыс болуымен түсіндіріледі. Зерттеу тақырыбының өзектілігі жасыл инвестициялар есебінен ұлттық экономиканы құрылымдық жаңғыртуға, көміртек ізі көлемін азайтуға, әлеуметтік маңызы бар бастамаларды қаржыландыруға және халықаралық тұрақты даму күн тәртібімен (SDGs) үйлесуге нақты мүмкіндіктер ашатынынан көрінеді.

Зерттеудің мақсаты-Қазақстан жағдайында ESG қағидаттарына сүйенетін жасыл облигациялар, жасыл несиелер мен инвестициялардың теориялық-әдіснамалық негіздерін нақтылау, олардың жасыл экономиканы қалыптастыру және тұрақты дамуды қолдаудағы маңызын зерделеу, сондай-ақ аталған құралдарды одан әрі өркендетуге бағытталған ұсынымдар әзірлеу.

Осы мақсатқа сәйкес зерттеуде мынадай міндеттер шешіледі:

- жасыл экономика, жасыл қаржыландыру, ESG-облигациялар және әлеуметтік облигациялар бойынша ғылыми көзқарастарды жүйелеу және ұғымдық-санаттық аппаратты нақтылау;

- ICMA Green Bond Principles, Climate Bonds Standard және өзге де құжаттар аясындағы жасыл облигациялар мен жасыл несиелердің халықаралық стандарттарын Қазақстандағы қалыптасқан тәжірибемен салыстырмалы талдау;

- Қазақстанда жасыл облигациялар, жасыл несиелер, сондай-ақ әлеуметтік және ESG-облигациялар нарығының қалыптасу ерекшеліктерін, басты эмитенттерін және қаржыландыры-

латын жасыл жобалардың бағыттарын сипаттау;

- жасыл қаржылық өнімдерге қатысты гринвошинг қатерлерін, сыртқы верификация рәсімдерін және ESG-есептілік тетіктерін айқындау;

- жасыл облигациялар мен несиелердің эмитенттер, инвесторлар және қоғам үшін экономикалық, экологиялық әрі әлеуметтік нәтижелілігін бағалау;

- жасыл қаржыландыру құралдарын одан әрі жетілдіру және оларды ұлттық тұрақты даму стратегияларымен үйлестіру бойынша институционалдық және реттеушілік ұсыныстар әзірлеу.

Зерттеудің әдістемелік негізін жүйелік, институционалдық және салыстырмалы талдау құрайды; ғылыми әдебиеттерге шолу, нормативтік-құқықтық және стратегиялық құжаттарды контент-талдау, халықаралық және ұлттық статистика мен эмитенттердің ашық ESG-есептілігі және жасыл облигациялар шығарылымы туралы деректерді талдау әдістері пайдаланылады. Зерттеудің гипотезасы: егер Қазақстанда ESG қағидаттарына сүйенген жасыл облигациялар мен жасыл несиелер нарығының институционалдық және реттеушілік базасы нығайып, верификация мен ашықтық тетіктері дамыса, бұл жасыл экономикаға көшу қарқынын жеделдетіп, ұлттық тұрақты даму мақсаттарына жетуге және қаржы жүйесінің орнықтылығын арттыруға ықпал етеді. Теориялық маңыздылығы – жасыл экономика, жасыл қаржыландыру және ESG-инвестициялар жөніндегі түсініктерді нақтылау және жасыл облигациялар мен несиелерді әлеуметтік және ESG облигацияларымен өзара байланыста қарастыруда; практикалық маңыздылығы – алынған қорытындыларды мемлекеттік органдар мен қаржы институттарының жасыл қаржыландыру саясатын жетілдіруде, жасыл қаржы қорларының қызметін ұйымдастыруда және ЖОО-лардың оқу жоспарларына жасыл қаржы мен ESG бойынша пәндер енгізуде қолдану мүмкіндігінде.

Материалдар мен әдістер. Зерттеудің әдіснамалық негізі негізгі сұрақ төңірегінде құрылған: ESG-ге бағытталған жасыл қаржы құралдары (жасыл облигациялар, жасыл несиелер, әлеуметтік және ESG облигациялары) Қазақстанның жасыл экономикаға көшуіне қалай ықпал ете алады және бұл үшін қандай институционалдық алғышарттар қажет. Негізгі гипотеза келесідей тұжырымдалған: егер Қазақстандағы жасыл облигациялар мен несие нарығының институционалдық және нормативтік базасы нығайтылса, ашықтық, тиісті тексеру және стандартталған ESG есептілігі қамтамасыз етілсе, бұл құралдар төмен көміртекті даму моделіне қарай ілгерілеуді айтарлықтай жеделдетіп, қаржы жүйесінің тұрақтылығын арттыра алады.

Зерттеудің эмпирикалық базасына мыналар кіреді:

- 2015-2025 жылдарға арналған жасыл экономика, жасыл қаржы және ESG инвестициялары бойынша қазақ, орыс және ағылшын тілдеріндегі ғылыми еңбектер (монографиялар, рецензияланған журналдардағы мақалалар, аналитикалық шолулар);

- тұрақты дамуды, жасыл экономикаға көшуді, бағалы қағаздар нарығының жұмыс істеуін және ESG ақпаратын ашуды реттейтін Қазақстан Республикасының нормативтік актілері мен стратегиялық құжаттары;

- әлемдік және Қазақстандағы жасыл және ESG облигацияларын орналастыру көлемі, корпоративтік облигациялар сегментінің құрылымы және PPP/MZhE жобаларының қаржылық параметрлері туралы статистика (үкіметтік және биржа дерекқорларынан алынған деректер, AIFC, AIX, ұлттық реттеушілер мен халықаралық институттардың есептері);

- жасыл облигациялар эмитенттері мен несиелік мекемелердің жария ESG есеп беруі. Пайдаланылған материал сапалық компонентті (құралдардың түрлерін, реттеуші режимдерді, институционалдық қатысушыларды сипаттау) және сандық компонентті (орналастыру көлемдері, нарық үлестері және «жасыл» жобалардың секторлары бойынша динамикалық қатарлар мен құрылымдық сипаттамалар) біріктіреді.

Зерттеу бірнеше өзара байланысты кезеңдерден өтті:

- жасыл экономикаға, жасыл қаржыға және ESG инвестициялауға негізгі тәсілдерге теориялық және тұжырымдамалық шолу жүргізілді, тұжырымдамалық негіз нақтыланды;

- тұрақты даму және қаржы нарығы саласындағы Қазақстанның ұлттық нормативтік базасы мен стратегиялық құжаттарына институционалдық талдау жүргізілді;

- ESG өлшемдері мен қаржылық сипаты (қарыз, меншікті капитал, гибридті, бюджеттік/субсидияланған) бойынша жасыл қаржы құралдарының меншікті матрицалық жіктемесі әзірленді;

- әлемдік және қазақстандық жасыл және ESG облигациялары нарықтары туралы ақпарат жиналып, статистикалық өңделді, динамикалық қатарлар мен салыстырмалы көрсеткіштер (корпоративтік облигация сегментіндегі жасыл құралдардың үлесі және MZHӘ жобаларын қаржыландыру көздерінің құрылымы) есептелді;

- нәтижелер халықаралық зерттеулермен салыстырылды және Қазақстанда жасыл қаржыландыруды одан әрі дамыту бойынша ұсыныстар тұжырымдалды.

Зерттеу жүйелік және институционалдық тәсілге негізделген, бұл жасыл қаржыны тұрақты даму мен қаржылық реттеудің кеңірек жүйесінің ажырамас бөлігі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Келесі әдістер қолданылды:

- негізгі үрдістер мен нормативтік талаптарды анықтау үшін ғылыми дереккөздердің, нормативтік құжаттардың және стратегиялық бағдарламалардың мазмұндық талдауы;

- жасыл және ESG облигациялары нарықтарының жұмыс істеуіндегі халықаралық және ұлттық тәжірибелердің салыстырмалы талдауы;

- стандартты кеңсе бағдарламалық жасақтамасынан кестелік және визуализация құралдарын пайдалана отырып, уақыт қатарларын статистикалық өңдеу (өсу қарқынын, құрылымдық үлестерді бағалау және деректерді графиктер мен диаграммаларда ұсыну);

- MZhÄ жобаларын қаржыландыру көздерінің схемасын және жасыл қаржы құралдарының матрицалық жіктемесін әзірлеудегі құрылымдық және логикалық модельдеу;

- анықталған үрдістер мен институционалдық кедергілерді түсіндіруде қолданылатын сараптамалық бағалау элементтері.

Қолданылған материалдар мен әдістердің үйлесімі бізге мыналарға мүмкіндік берді: жасыл қаржы құралдарының матрицалық жіктелуінің авторлық нұсқасын негіздеуге; Қазақстанның жаһандық жасыл және ESG облигациялар нарығындағы орнын, сондай-ақ корпоративтік облигациялар сегментіндегі «жасыл» құралдардың үлесін сандық бағалауға; «жасыл» жобаларды іске асырудың басым секторларын және оларды қаржыландыру көздерінің конфигурациясын анықтауға; тексеруге, ESG есептілігіне және «жасыл жуу» қаупіне байланысты негізгі институционалдық кемшіліктерді анықтауға. Жалпы алғанда, бұл зерттеу әдіснамасын қойылған мақсаттарға сәйкес келетіндей қарастыруға, алынған нәтижелердің сенімділігін қамтамасыз етуге және Қазақстандағы жасыл қаржы және ESG инвестициялық саясаты саласындағы кейінгі, егжей-тегжейлі эмпирикалық және эконометрикалық зерттеулер үшін негіз қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Нәтижелер мен талқылау. Зерттеу нәтижесінде жасыл экономика мен ESG қағидаттарына сүйенетін жасыл қаржыландыру құралдарының халықаралық және ұлттық тәжірибесі жан-жақты қарастырылып, Қазақстан жағдайына икемделген бірқатар қорытындылар жасалды.

Ең алдымен теориялық еңбектер мен нормативтік құжаттар негізінде жасыл қаржы құралдарының (жасыл облигациялар, жасыл несиелер, әлеуметтік және ESG-облигациялар, жасыл инвестициялық пай қорлары, жасыл микрокредиттер және т.б.) құрылымдық жіктемесі жасалды [4,5]. Ұсынылған жіктеу екі басты өлшемге сүйенеді: ESG құрамдастары (E-экологиялық ықпал, S-әлеуметтік нәтиже, G-корпоративтік басқару деңгейі) және қаржылық табиғаты (қарыздық, үлестік, аралас нысандар, сондай-ақ бюджеттік/субсидиялық құралдар). Осы тәсілдің негізінде «Жасыл қаржылық құралдардың ESG

өлшемдері мен қаржылық табиғаты бойынша жіктелуі» атты матрица түріндегі визуалды модель құрастырылды (сурет 1). Мұндай жүйелеу экологиялық тұрғыдан қауіпсіз өнім желілерін қалыптастыруда эмитенттер мен реттеуші органдарға әдістемелік бағдар ретінде қызмет ете алады.

Құрал түрі	E Экология	S Әлеуметтік	G Басқару	Қаржылық табиғаты
Жасыл облигациллар	+	±	+	Қарыздық
Әлеуметтік облигациллар	±	+	±	Қарыздық
ESG-облигацилар (sustainability, sustainability-linked)	+	+	+	Қарыздық
Жасыл несиелер	+	±	±	Қарыздық
Жасыл инвестициялық қорлар	+	+	+	Үлестік / аралас
Жасыл микрокредиттер	+	+	±	Қарыздық / Бюджеттік (субсидиялық)

Түсіндірме: «+» — басым өлшем, «±» — орташа/ішінара көрініс табады.

1-сурет. Жасыл қаржылық құралдарды ESG өлшемдері мен қаржылық сипаты негізінде матрицалық түрде топтастыру

Сурет 1-де берілген матрицалық жіктеу жасыл қаржылық құралдардың негізгі бөлігі қарыздық құралдарға тиесілі екенін, сондай-ақ басым назардың экологиялық өлшемге (E) аударылатынын көрсетеді, ал әлеуметтік (S) және корпоративтік басқару (G) қырлары, әсіресе дәстүрлі жасыл облигациялар мен несиелерде, көбіне қосалқы немесе шектеулі түрде ескеріледі. ESG-облигациялар мен жасыл инвестициялық қорлар үш өлшемді де салыстырмалы түрде тең дәрежеде қамтитын интеграцияланған форматымен ерекшеленіп, жауапты инвесторлар үшін тартымдылығы жоғары құралдар қатарында көрінеді. Ұсынылған матрица эмитенттерге қай ESG-компоненттерін күшейту қажеттігін айқындауға, ал реттеуші органдарға ұлттық жасыл таксономияны әзірлеу барысында қандай құралдарды бірінші кезекте экологиялық, қандайларын әлеуметтік немесе кешенді тұрақты даму мақсаттарымен байланыстыру орынды екенін бағалауға мүмкіндік береді.

Халықаралық статистика мен Қазақстанға қатысты қолжетімді мәліметтерді салыстырмалы талдау жасыл облигациялар нарығының тұрақты өсуін және ESG-облигациялар сегментінің жедел кеңеюін айқындады [4,5]. Әлемдік деңгейде жасыл және басқа да тұрақты облигациялар (social, sustainability-linked) жиынтық нарығы соңғы жылдары дәстүрлі облигациялардан жылдам өсіп, эмитенттер құрылымында инфрақұрылымдық компаниялармен бірге қаржы ұйымдарының үлесі ұлғайғаны байқалады. Қазақстанда 2020 жылдан кейін жасыл және ESG-облигациялар бойынша алғашқы орналастырулар жүзеге асырылып, ұлттық биржалардағы олардың көлемі жыл сайын артып келеді; аталған үрдіс Мангибаева Д.Д. және басқа зерттеушілердің нәтижелерімен де қуатталады [5]. Осы қорытындыларды визуализациялау үшін 2015-2024 жылдар аралығында әлемдік және Қазақстандағы жасыл/ESG-облигациялар нарығы көлемінің салыстырмалы динамикасы сурет 2-де берілген.

Суретте 2015-2024 жж. аралығындағы әлемдік және Қазақстандағы жасыл/ESG-облигациялар нарығының динамикасы салыстырмалы түрде берілген: жаһандық деңгейде бұл сегмент негізінен тұрақты өсу траекториясын сақтап, 89 млрд доллардан 975 млрд долларға дейін ұлғайған, тек 2020 жылы ғана қысқа

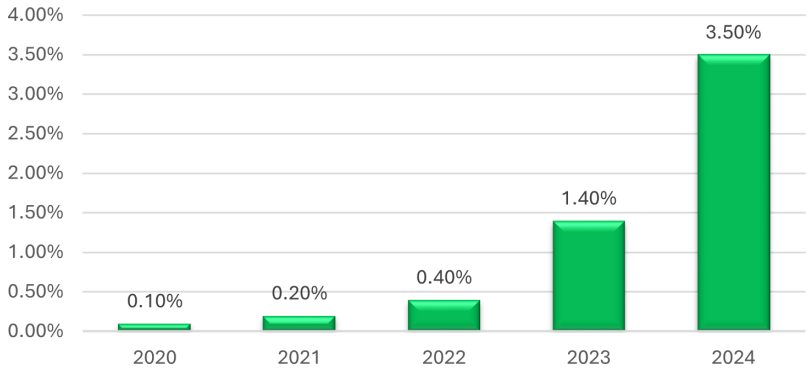
мерзімді төмендеу байқалады. Қазақстанда жасыл облигациялар нарығы 2021 жылдан бастап қалыптасып, бастапқы өте төмен көлемдерден (10 млн доллар) 2024 жылға қарай 475 млн долларға дейін жедел өсім көрсеткен. Осылайша, абсолюттік көрсеткіштер тұрғысынан ұлттық нарық әлемдік ауқымнан әлі де айтарлықтай төмен болғанымен, өсім қарқынының жоғары болуы елде жасыл қаржыландыруды кеңейтуге елеулі әлеует пен институционалдық алғышарттардың бар екенін білдіреді.



2-сурет.2015–2024 жылдары әлемдік және Қазақстандағы жасыл/ESG-облигациялар нарығы көлемінің салыстырмалы өзгеру динамикасы

Ескертпе: суреттегі жасыл/ESG-облигациялар жөніндегі әлемдік және Қазақстан көрсеткіштері [4-5; 11] деректеріне негізделген авторлық талдау нәтижесінде құрастырылған

Сонымен бірге, Қазақстан бойынша алынған деректерді талдау жасыл облигациялардың жалпы корпоративтік облигациялар нарығындағы үлесі әлі де мардымсыз болғанымен, олардың өсу қарқыны жоғары екенін көрсетті. Бұл үрдіс корпоративтік облигациялар нарығында жасыл және ESG-облигациялардың пайыздық үлесін көрсететін диаграммада (сурет 3) көрнекі түрде ұсынылған.

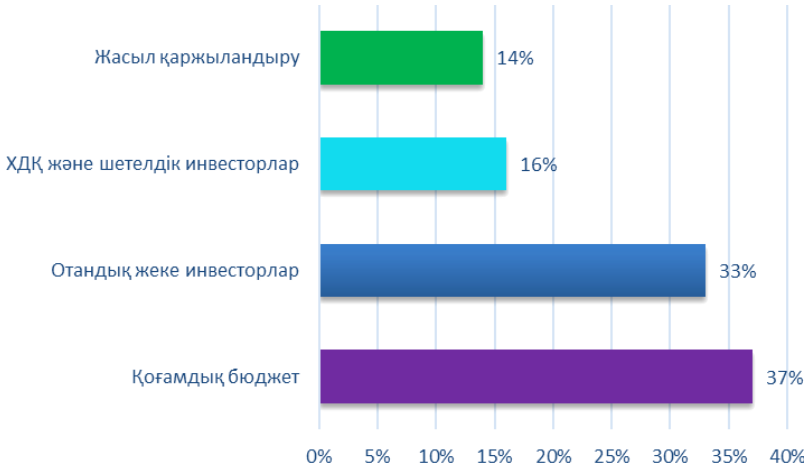


3-сурет. Қазақстандағы корпоративтік облигациялар нарығындағы жасыл және ESG-облигациялардың үлесі, %

Ескертпе: сурет Қазақстандағы жасыл/ESG-облигациялар нарығы мен корпоративтік облигациялар құрылымына қатысты деректер негізінде автор жүргізген есептеулерді көрсетеді; есептеулерде [9-11] дереккөздері пайдаланылған.

Сурет 3-тегі мәліметтер 2020-2024 жылдар аралығында Қазақстанның корпоративтік облигациялар нарығындағы жасыл және ESG-облигациялар үлесінің 0,1%-дан 3,5%-ға дейін өскенін, яғни үрдістің сапалық тұрғыдан біртіндеп жоғарылағанын көрсетеді.2020-2022 жж. аралығында бұл үлес небәрі 0,1-0,4% шегінде баяу ұлғайып, жасыл сегменттің негізінен пилоттық сипатта болғанын байқатса, 2023 жылдан бастап серпінді кеңею кезеңі басталып, алдымен 1,4%-ға дейін, ал алдын ала бағалау бойынша 2024 жылы 3,5%-ға дейін өсуі жасыл қаржы құралдарының корпоративтік қаржы құрылымына нақты ене бастағанын білдіреді. Сонымен қатар, олардың үлесі жалпы нарық көлемінде әлі де салыстырмалы түрде төмен деңгейде қалып отыр, бұл институционалдық қолдауды күшейту мен эмиссия ауқымын ұлғайту қажеттігін көрсетеді.

Зерттеу қорытындылары Қазақстан жағдайында «жасыл» экономиканың басым секторларын да айқындауға мүмкіндік берді. Жаңартылатын энергия көздері, энергия тиімділігі, су ресурстарын басқару, қалдықтарды басқару, көлік және аграрлық сектор жасыл қаржыландырудың негізгі векторлары ретінде белгіленді [6,7]. Жагыпарова А.О. және оның әріптестерінің жұмыстарын, сондай-ақ ұлттық стратегиялық құжаттарды талдау негізінде жасыл қаржы құралдары есебінен қаржыландырылған немесе алдағы уақытта қаржыландырылуы мүмкін жобалардың секторлық құрылымы жүйеленді [6]. Бұл құрылымға жаңартылатын энергия және төмен көміртекті генерация, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық (энергоүнемдеуші жаңғырту, «жасыл» құрылыс), көлік саласы (электр көлігін дамыту, қоғамдық көлік паркін жаңарту), су ресурстарын басқару және ауыл шаруашылығы (суды үнемдеу технологиялары, топырақ құнарлылығын сақтау), сондай-ақ қалдықтарды басқару мен қайта өңдеу бағыттары кіреді. Аталған секторлардың салыстырмалы үлесі «Қазақстандағы жасыл қаржыландыру есебінен іске асырылған (немесе жоспарланып отырған) жобалардың секторлық құрылымы» атты диаграммада (сурет 4) көрнекі түрде көрсетілген. Бұл нәтижелер ұлттық «жасыл» таксономияны әзірлеу үшін эмпирикалық база ретінде қызмет етіп, экологиялық тұрғыдан таза жобалар мен өнімдерді іріктеу өлшемшарттарын нақтылауға ықпал етеді.



4-сурет. Қаржыландыру көздері бойынша МЖӘ жобаларының құрылымдық үлесі, %

Ескертпе: [6, 7, 11] дереккөздеріндегі мәліметтер негізінде авторлар әзірлеген

Сурет 4 мәліметтері бойынша, МЖӘ жобаларының қаржыландыру құрылымында негізгі үлесті қоғамдық бюджет (37%) пен отандық жеке инвесторлар (33%) иеленеді, халықаралық даму институттары мен шетелдік инвесторлардың үлесі 16% шамасында. Жасыл қаржылан-

дыру әзірге 14% деңгейінде қалып, жалпы портфельде қосалқы орынға ие болғанымен, оның МЖӘ жобалары құрылымында жеке санат ретінде бөлінуі алдағы уақытта «жасыл» құралдарды кеңейтіп, оларды қоғамдық және жеке қаржы көздерімен тереңірек ұштастыруға елеулі мүмкіндік бар екеніне меңзейді.

Нормативтік және әдістемелік материалдарды (ұлттық «жасыл» экономикаға көшу тұжырымдамасы, жасыл қаржыға арналған бағдарламалық актілер, әдістемелік ұсынымдар) талдау Қазақстанда жасыл қаржыландыруды дамытуға арналған институционалдық базаның кезең-кезеңімен күшейіп жатқанын көрсетті [6]. Алайда жасыл облигациялар мен несиелерге қатысты жобалардың «жасыл» мәртебесін растау (верификация) тәжірибесінің ICMA, Climate Bonds Initiative және өзге де халықаралық стандарттарға толық сәйкестендірілмеуі, ESG-есептіліктің бірыңғай форматының кеңінен қолданылмауы, сондай-ақ «жасыл» және әлеуметтік әсер көрсеткіштерін айқындау әдістемелерінің біріздендірілмеуі гринвошинг тәуекелдерін күшейтетін факторлар ретінде анықталды [7]. Аталған тұжырымдар 5-бөлімде қарастырылған гринвошингтің негізгі көріністері мен оны шектеу тетіктерін нақтылай түсіп, ұлттық деңгейде сыртқы верификаторлар институтын, тәуелсіз ESG-рейтингтер жүйесін және ашықтыққа негізделген есептілік стандарттарын дамыту қажеттігін дәлелдейді.

Алынған мәліметтер жасыл экономиканы қаржыландыруға арналған құралдар мен институттарды жүйелеу, олардың нарықтық даму динамикасын сипаттау және Қазақстанға тән ерекшеліктерін көрсету тұрғысынан бірқатар мәнді тұжырымдар жасауға мүмкіндік береді. Ең алдымен, ESG өлшемдері мен қаржылық сипаттарына сүйене отырып құрастырылған жасыл қаржы құралдарының матрицалық жіктемесі халықаралық әдебиетте берілген тәсілдермен әдістемелік тұрғыда үйлеседі. Шетелдік зерттеулерде жасыл облигациялар мен өзге де тұрақты қаржы құралдары көбіне экологиялық, әлеуметтік және басқарушылық әсерді қатар қамтитын кешенді өнімдер ретінде сипатталатыны көрсетілген, бұл біздің құралдарды E, S, G компоненттері мен қарыздық/үлестік сипатының қиылысында қарастыру логикасымен сәйкес келеді [8]. Осындай жіктеу форматы эмитенттер үшін өнімдер желісін жоспарлауда, ал реттеуші органдар үшін ұлттық жасыл таксономияның құрылымын жобалауда қолданбалы бағдар қызметін атқара алады.

Жасыл облигациялар мен ESG-құралдар нарығының жаһандық және ұлттық деңгейдегі даму траекториясын салыстыру нәтижелері халықаралық әдебиетте сипатталған негізгі бағыттармен үйлеседі. Ғылыми еңбектерде жасыл облигациялар эмиссиясының өсуі эмитенттер үшін капитал құнының төмендеуімен, ақпараттық асимметрияның азаюымен және нарықтық өтімділіктің жақсаруымен қатар жүретіні көрсетілген [8]. Біздің зерттеу қорытындылары да әлемдік деңгейде тұрақты облигациялар нарығының жалпы облигациялар нарығына қарағанда қарқындырақ кеңейіп жатқанын, ал Қазақстанда жасыл және ESG-облигациялар сегменті көлемі жағынан әлі шағын болғанымен, өсім қарқынының жоғары екенін аңғартады. Бұл, бір жағынан, халықаралық үрдістердің ұлттық нарыққа белгілі бір уақыттық кідіріспен трансляцияланатынын, екінші жағынан – жасыл қаржыландыруды ұлғайту үшін институционалдық «мүмкіндіктер терезесінің» сақталып отырғанын білдіреді.

Сонымен қатар, ESG-инвестициялардың тәуекел мен табыстылық арақатынасы жөніндегі халықаралық талқылаулар бұл құралдарға деген сұраныс артып келе жатқанымен, инвесторлардың күтулері біркелкі емес екенін көрсетеді. Жүйелік шолуларда ұзақ мерзімді кезеңде «жасыл» активтердің кірістілігі дәстүрлі құралдарға қарағанда төмендеу болуы мүмкін екені, ал қысқа мерзімде ESG-портфельдер белгілі бір артықшылықтар ұсына алатыны атап өтіледі [9]. Біздің зерттеу қорытындылары да осы пайымдаулармен үндес: Қазақстандағы эмиссияның құрылымы мен ауқымы әзірге шағын болғандықтан, «жасыл премия» немесе «жасыл дисконт» құбылыстарын статистикалық тұрғыдан нақтылы бағалау мүмкіндігі шектеулі, дегенмен эми-

тенттер үшін беделдік тиімділік пен инвесторлар шеңберін кеңейту факторы айқын байқалады.

Жасыл жобалардың секторлық бөлінісі де халықаралық тәжірибемен салыстырғанда қисынды әрі негізделген екенін көрсетеді. Қазақстанда жасыл қаржыландырудың негізгі бағыттарының жаңартылатын энергетика, энергия тиімділігі, коммуналдық инфрақұрылым, көлік және агросекторға шоғырлануы ұлттық «жасыл» экономикаға көшу тұжырымдамасымен, сондай-ақ ESG қағидаттарын стратегиялық деңгейде кіріктіруге бағытталған зерттеу нәтижелерімен үйлеседі [10]. Мұндай құрылым елдің ресурстық-энергетикалық ерекшеліктеріне, көміртек қарқындылығының деңгейіне және өңірлік даму басымдықтарына сай келеді, бірақ сонымен бірге әлеуметтік әсері жоғары бастамалардың (қолжетімді «жасыл» тұрғын үй, инклюзивті инфрақұрылым, ауылдық аумақтарды жаңғырту) үлесін көбейтуге мүмкіндік беретін әлеует сақталып отыр.

Институционалдық ортаға қатысты нәтижелер біркелкі емес көрініс байқатады. Бір жағынан, ұлттық стратегиялар, жасыл таксономияның жекелеген элементтері, AIFC Green Finance Centre қызметі мен даму институттарының қатысуы ESG қағидаттары мен «жасыл» экономиканың тұрақты даму саясатына кезең-кезеңімен ендіріліп жатқанын көрсетеді [6, 11]. Екінші жағынан, верификация рәсімдерінің бытыраңқылығы, ESG-есептіліктің бірыңғай стандарттарының кеңінен қолданылмауы, әсер көрсеткіштерін айқындау әдістемелерінің бірыңғайланбауы гринвошинг тәуекелдерін күшейтіп, инвесторлардың сеніміне теріс ықпал етуі ықтимал [5, 9]. Осы тұрғыдан алғанда, халықаралық әдебиетте талқыланатын корпоративтік ESG-тәжірибенің шынайылығы мен «маркетингтік» сипаттағы дискурс арасындағы қайшылықтар Қазақстан контексті үшін де өзекті болып отыр.

Гринвошинг тәуекелдері мен оларды шектеу жолдарына қатысты алынған нәтижелер халықаралық талқылауларда айқындалған негізгі бағдарлармен сәйкес келеді. Әдебиеттерде ESG-инвестициялардың көлемі жедел ұлғайған сайын компаниялар мен қаржы ұйымдары ESG-тілдес риториканы кеңінен қолдана бастайтыны, алайда қатаң реттеу мен біріздендірілген есептілік болмаған жағдайда бұл үрдіс формализмге ұласу қаупін күшейтетіні көрсетіледі [9]. Қазақстан жағдайында жасыл облигациялар мен несиелер бойынша жобалардың «жасыл» мәртебесін айқындау кезінде анықталған олқылықтар сыртқы верификаторлар институтын, тәуелсіз ESG-рейтингтерді және ашық есептілік талаптарын күшейту қажеттілігін айғақтайды. Бұл, өз кезегінде, ICMA Green Bond Principles, Climate Bonds Standard және өзге де халықаралық стандарттарға жақындасу мен оларды ұлттық деңгейде бейімдеу арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті табуды талап етеді [12].

ESG қағидаттарын ұлттық тұрақты даму стратегияларымен сәйкестендіру мәселесіне қатысты жүргізілген талдау Қазақстанның бұл бағыттағы мүмкіндіктері айтарлықтай екенін көрсетті. Соңғы жылдары жарияланған еңбектерде ESG-саясатты ұлттық деңгейде енгізу инвестициялық тартымдылықты күшейтуге, институционалдық ортаның сапасын арттыруға және қоғамның жалпы әл-ауқатын жоғарылатуға үлес қосатыны дәлелденген [11]. Біздің зерттеу қорытындылары жасыл қаржыландыру құралдарын (жасыл облигациялар, жасыл несиелер, әлеуметтік және ESG-облигациялар) ұлттық стратегиялық құжаттармен, декарбонизация міндеттерімен және «жасыл» күн тәртібімен нақты түрде үйлестіру қажеттігін көрсетіп отыр. Алайда бұл өзара байланыс әлі толық қалыптасқан жоқ: стратегиялық құжаттар көбіне жалпы бағдар берумен шектелсе, қаржылық өнімдер мен реттеуші механизмдер көбінесе пилоттық немесе жекелеген жобалар деңгейінде іске асырылуда.

Экономикалық және әлеуметтік тиімділік призмасы арқылы жасыл облигациялар мен несиелердің әсерін талдау халықаралық әдебиетте жасалған тұжырымдармен бірқатар ортақ белгілерге ие екенін көрсетті. Эмпирикалық зерттеулерде green bond issuance компаниялар үшін капитал құнының төмендеуіне, ақпараттық ашықтықтың артуына және нарықтағы беделдің нығаюына алып келетіні дәлелденген [8]. Біздің

талдау да эмитенттер үшін ұзақ мерзімді қаржыландыру базасын кеңейту, ESG-тәжірибелерді ұйымдық деңгейде бекіту және мүдделі тараптар алдындағы есептілік дәрежесін жоғарылату сияқты оң нәтижелерді айқындады. Инвесторлар жағынан қарағанда, тәуекелдерді әртараптандыру, ұзақ мерзімді тұрақтылық және қаржылық, сондай-ақ әлеуметтік-экологиялық әсерді біріктіретін «қосарланған табыстылық» тұжырымдамасы негізгі тартымдылық факторларының бірі болып отыр.

Сонымен бірге, алынған нәтижелер зерттеудің шектеулері мен алдағы ізденістерге қатысты бірқатар бағыттарды да айқындады. Біріншіден, деректердің қолжетімділігі мен толықтығы шектеулі: жасыл және ESG-облигациялар, жасыл несиелер, сондай-ақ жоба деңгейіндегі әсер индикаторлары бойынша ашық статистика жеткілікті түрде жинақталмаған. Екіншіден, осы жұмыста қолданылған тәсіл негізінен сипаттамалық және салыстырмалы талдаумен шектеледі; келешекте жасыл қаржыландырудың эмитенттердің қаржылық нәтижелеріне, капитал құнына және көміртек ізі динамикасына ықпалын эконометрикалық модельдер арқылы сандық бағалау маңызды болып табылады. Үшіншіден, инвесторлардың жарияланған ESG-ұстанымдары мен олардың нақты инвестициялық таңдаулары арасындағы алшақтықты, сондай-ақ халықтың «жасыл» қаржы құралдары бойынша қаржылық сауаттылық деңгейін арнайы зерттеу қажет.

Жалпы, алынған деректер зерттеудің бастапқы гипотезасын белгілі бір дәрежеде қуаттады: егер Қазақстанда ESG қағидаттарына негізделген жасыл облигациялар мен жасыл несиелер нарығының институционалдық және реттеушілік іргетасы нығайып, верификация мен ашықтық механизмдері дамытылса, бұл құралдар «жасыл» экономикаға көшу үдерісін жеделдетіп, ұлттық тұрақты даму мақсаттарына жетуге мәнді үлес қоса алады. Сонымен қатар, осы трансформацияның нәтижелілігі жасыл қаржыландыруды жалпы экономикалық саясатпен, салалық даму стратегияларымен және қоғамда жауапты инвестициялау мәдениетін қалыптастыру деңгейімен қаншалықты үйлесімді ұштасатынына тәуелді болады.

Қорытынды. Зерттеудің негізгі мақсаты - Қазақстан контексінде ESG қағидаттарына сүйенетін жасыл облигациялар, жасыл несиелер және инвестициялар институттарының теориялық-әдіснамалық алғышарттарын айқындау, олардың жасыл экономиканы қалыптастырудағы және тұрақты дамуды қамтамасыз етудегі маңызын талдау, сондай-ақ бұл құралдарды кейінгі кезеңде ілгерілетуге бағытталған ұсынымдар ұсыну болды. Қойылған мақсатқа жету үшін жүйелік, институционалдық және салыстырмалы талдау әдіснамасы қолданылып, ғылыми еңбектерге шолу жасалды, нормативтік-құқықтық және стратегиялық құжаттарға контент-талдау жүргізілді, халықаралық және ұлттық статистикалық мәліметтер, эмитенттердің ашық ESG-есептілігі мен жасыл облигациялар эмиссиясына қатысты ақпарат талданды.

Алынған деректер бірқатар маңызды ғылыми тұжырым жасауға негіз болды. Біріншіден, ESG өлшемдері мен қаржылық сипатын ескеріп құрылған жасыл қаржылық құралдардың матрицалық жіктемесі жасыл облигациялар, несиелер, әлеуметтік және ESG-облигациялар, жасыл инвестициялық қорлар мен микрокредиттердің өзара байланысы мен орнына түсінік беріп, ұлттық жасыл таксономияны қалыптастыруға әдістемелік база ұсынды. Екіншіден, әлемдік және қазақстандық жасыл/ESG-облигациялар нарықтарының динамикасын салыстыру нәтижесінде жаһандық деңгейде бұл сегменттің тұрақты өсу бағытын сақтап отырғаны, ал Қазақстанда нарықтың кеш пайда болғанымен, соңғы жылдары өте жоғары өсім қарқынына жеткені анықталды; сонымен қатар, жасыл құралдардың корпоративтік облигациялар нарығындағы үлесі әлі де аз екені байқалды. Үшіншіден, жаңартылатын энергетика, энергия тиімділігі, коммуналдық инфрақұрылым, көлік, су ресурстары және агросектор жасыл қаржыландырудың негізгі басым салалары ретінде белгіленіп, МЖӘ жобаларының қаржыландыру құрылымында жасыл компонент-

тің әзірге қосалқы, бірақ әлеуеті жоғары бағыт екені көрсетілді. Төртіншіден, нормативтік базаның біртіндеп дамуына қарамастан, верификация, ESG-есептілік стандарттары және әсер көрсеткіштерін есептеу әдістемелеріндегі кемшіліктер гринвошинг тәуекелдерін күшейтетіні анықталып, осыған байланысты институционалдық тетіктерді жетілдіру қажеттігі негізделді.

Осы қорытындылар бастапқы гипотезаның жалпы алғанда расталатынын көрсетеді: Қазақстанда ESG қағидаттарына негізделген жасыл облигациялар мен жасыл несиелер нарығының институционалдық және реттеушілік базасы нығайып, верификация және ашықтық тетіктері дамыған жағдайда, аталған құралдар «жасыл» экономикаға көшу үдерісін жеделдетуге, ұлттық тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізуге, сондай-ақ қаржы жүйесінің орнықтылығын күшейтуге айтарлықтай үлес қоса алады. Бұдан бөлек, зерттеу жасыл қаржыландырудың экономикалық (капитал құнын азайту, инвесторлар шоғырын кеңейту, беделдік тиімділік), экологиялық (көміртек ізін төмендету, ресурстарды ұтымды пайдалану) және әлеуметтік (жұмыс орындарын құру, инфрақұрылым сапасын жақсарту) нәтижелерін кешенді түрде бағалау және оларды саясаттық әрі корпоративтік шешімдерге жүйелі түрде енгізу қажеттігін айқындап отыр.

Перспективаларды бағалау тұрғысынан, бірінші ден, ұлттық жасыл таксономияны халықаралық стандарттармен сәйкестендіре отырып толықтыру, жобалардың «жасыл» мәртебесін тәуелсіз верификаторлар арқылы растау тетігін қалыптастыру, ESG-есептіліктің бірыңғай үлгілерін енгізу және жасыл облигациялар мен несиелер бойынша деректерді қамтитын ашық статистикалық база жасау қажеттілігі алға шығады. Екіншіден, болашақ зерттеулерде жасыл қаржыландырудың эмитенттердің қаржылық нәтижелеріне, капитал құнына және көміртек шығарындыларына ықпалын эконометрикалық тәсілдермен өлшеу, сондай-ақ инвесторлардың жарияланған ESG-ұстанымдары мен олардың нақты инвестициялық таңдаулары арасындағы алшақтықты эмпирикалық талдау өзекті. Үшіншіден, жасыл қаржы құралдарын МЖӘ механизмдерімен, мемлекеттік бюджет және даму институттары бағдарламаларымен тығыз ұштастыру, өңірлік және жергілікті деңгейде «жасыл» жобаларға арналған пилоттық платформалар құру, халық пен бизнес үшін қаржылық әрі экологиялық сауаттылықты арттыруға бағытталған кешенді шаралар пакетін әзірлеу маңызды. Осындай шаралар жасыл қаржыландыру инфрақұрылымын Қазақстанның экономикалық, экологиялық және әлеуметтік даму стратегияларымен терең интеграциялауға және алынған ғылыми нәтижелерді нақты саясат пен тәжірибеде іске асыруға жағдай жасайды.

Әдебиеттер

1. International Capital Market Association (ICMA). Green Bond Principles (GBP).2025 edition. -URL:https://www.icmagroup.org/sustainable-finance/the-principles-guidelines-and-handbooks/green-bond-principles-gbp/- Қаралған күні: 15.01.2026.

2. AIFC Green Finance Centre. Green finance market in Kazakhstan. Analytical report. Astana: AIFC Authority. -2023.-URL https://aifc.kz/news/green-finance-market-in-kazakhstan/- Қаралған күні: 15.01.2026.

3. United Nations Development Programme in Kazakhstan. UNDP catalyses issuance of first green bonds in Kazakhstan.29.10.2020.-URL: https://www.undp.org/kazakhstan/stories/undp-catalyses-issuance-first-green-bonds-kazakhstan- Қаралған күні: 15.01.2026

4. Петросянц Т.В. Современное состояние «зеленого» финансирования в Казахстане // Colloquium-journal. -2023. -№ 29(188). -С.32-33.DOI 10.24412/2520-6990-2023-29188-32-33.

5. Мангибаева Д.Д. Потенциал развития инструментов зеленого финансирования в Республике Ка-

захстан // Colloquium-journal. -2023. -№28(173). -С.39-43. DOI 10.24412/2520-6990-2023-28187-39-43

6. Жагыпарова А.О., Мухияева Д.М., Сембиева Л.М. Қазақстан үшін «жасыл» экономиканың басымдықтары // Education. Quality Assurance. -2025. -№ 1. -Б.93-103. DOI 10.58319/26170493_2025_1_93/

7. Калмыков Д.Е. Жасыл экономика бойынша қысқаша нұсқаулық. ЭкоМұражай//Sinest. -2017.-32 б.

8. Zhang R., Li Y., Liu Y. Green bond issuance and corporate cost of capital//Pacific-Basin Finance Journal. -2021.-Vol.69:01626. DOI 10.1016/j.pacfin.2021.101626.

9. Kräussl R., Oladiran T., Stefanova D. A review on ESG investing: Investors' expectations, beliefs and perceptions//Journal of Economic Surveys. -2024.-Vol.38(2). -P.476-502. DOI 10.1111/joes.12599.

10. Yessymkhanova Z., Birmagambetov T., Dauletkhanova Zh., Baimamyrov B. Current status of green finance in Kazakhstan // E3S Web of Conferences. -2023.-Vol.402:08033. DOI 10.1051/e3sconf/202340208033.

11. Spankulova L., Aben A., Nurmukhametov N., Zeinolla S. Integration of ESG principles into the sustainable development strategy of Kazakhstan // Journal of Central Asian Studies. -2025.-Vol.23(1) -P.61-86. DOI 10.52536/3006-807X.2025-1.004.

12. Climate bonds standard Globally recognised, Paris-aligned Certification of debt instruments, entities and assets using robust, science-based methodologies.- URL:https://www.climatebonds.net/files/documents/Climate-Bonds_Climate-Bonds-Standard_V4-1_Feb-2024.pdf . - Қаралған күні: 15.01.2026.

References

1. International Capital Market Association (ICMA). Green Bond Principles (GBP).2025 edition. -URL:https://www.icmagroup.org/sustainable-finance/the-principles-guidelines-and-handbooks/green-bond-principles-gbp/ - Date of access: 15.01.2026.

2. AIFC Green Finance Centre. Green finance market in Kazakhstan. Analytical report. Astana: AIFC Authority. -2023.-URL https://aifc.kz/news/green-finance-market-in-kazakhstan - Date of access: 15.01.2026.

3. United Nations Development Programme in Kazakhstan. UNDP catalyses issuance of first green bonds in Kazakhstan.29.10.2020.-URL: https://www.undp.org/kazakhstan/stories/undp-catalyses-issuance-first-green-bonds-kazakhstan - Date of access: 15.01.2026.

4. Petrosjanc T.V. Sovremennoe sostojanie «zelenogo» finansirovanija v Kazahstane // Colloquium-journal. -2023. -№ 29(188). -S.32-33.DOI 10.24412/2520-6990-2023-29188-32-33. [in Russian]

5. Mangibaeva D.D. Potencial razvitija instrumentov zelenogo finansirovanija v Respublike Kazahstan // Colloquium-journal. -2023. -№28(173). -S.39-43.DOI 10.2441/2526-6990-2023-28187-39-43. [in Russian]

6. Zhagyparova A.O., Muhijaeva D.M., Sembieva L.M. Қazақstan үshin «zhasyl» jekonomikanuң basymdyқtary // Education. Quality Assurance. -2025. -№ 1. -B.93-103. DOI 10.58319/26170493_2025_1_93/ [in Russian]

7. Kalmykov D.E. Zhasyl jekonomika bojynsha қysқasha nұsқaulyқ. JekoMұrazhaj//Sinest. -2017.-32 b. [in Kazakh]

8. Zhang R., Li Y., Liu Y. Green bond issuance and corporate cost of capital//Pacific-Basin Finance Journal. -2021.-Vol.69:01626. DOI 10.1016/j.pacfin.2021.101626.

9. Kräussl R., Oladiran T., Stefanova D. A review on ESG investing: Investors' expectations, beliefs and perceptions//Journal of Economic Surveys. -2024.-Vol.38(2). -P.476-502. DOI 10.1111/joes.12599.

10. Yessymkhanova Z., Birmagambetov T., Dauletkhanova Zh., Baimamyrov B. Current status of green finance in Kazakhstan // E3S Web of Conferences. -2023.-Vol.402:08033. DOI 10.1051/e3sconf/202340208033.

11. Spankulova L., Aben A., Nurmukhametov N., Zeinolla S. Integration of ESG principles into the sustainable development strategy of Kazakhstan // Journal of Central Asian Studies. -2025.-Vol.23(1) -P.61-86. DOI 10.52536/3006-807X.2025-1.004.

12. Climate bonds standard Globally recognised, Paris-aligned Certification of debt instruments, entities and assets using robust, science-based methodologies.- URL:https://www.climatebonds.net/files/documents/Climate-Bonds_Climate-Bonds-Standard_V4-1_Feb-2024.pdf . - Date of access: 15.01.2026.

Авторлар туралы мәлімет

Мамутова Қ.Қ.-экономика ғылымдарының кандидаты, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: Katira.7575@mail.ru;

Машраб Ж.С.- докторанты, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан,e-mail: zmashrab@bk.ru;

Айтымбетова А.Н.-экономика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: a.ainura-81@mail.ru.

Information about the authors

Mamutova K.- Candidate of Economic Sciences, associate professor, Auezov University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: Katira.7575@mail.ru;

Mashrab Zh.- PhD student, Auezov University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: zmashrab@bk.ru;

Aitymbetova A.- Candidate of Economic Sciences associate professor, Auezov University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: a.ainura-81@mail.ru.

ҒТАМР 06.39.02 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.30-1438**

ЦИФРЛАНДЫРУ ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ЖОҒАРЫ ОҚУ ЖЕРЛЕРІНІҢ ЖАҺАНДЫҚ БӘСЕКЕЛЕСТІККЕ ҚАБІЛЕТТІЛІГІН АРТТЫРУ ФАКТОРЫ РЕТІНДЕ: ЭКОНОМИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ АСПЕКТІЛЕР

[1]З.Т. Төребекова✉, [2]Б.Н. Боқаев, [3]А.Д. Бактияров, [1]Н.Б. Айжарыков

[1]Алматы менеджмент университеті, Алматы, Қазақстан,
[2]Қарағанды индустриалды университеті, Теміртау, Қазақстан,
[3]Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

✉ *Корреспондент-автор: zttemirkhan@gmail.com*

Зерттеу тақырыбының өзектілігі цифрлық технологиялар мен жасанды интеллектінің (ЖИ) қарқынды дамуы жоғары оқу орындарындағы білім беру және басқарушылық үдерістерді түбегейлі өзгертетіндігінде, бұл университеттердің жаһандық бәсекеге қабілеттілігін арттыруға мүмкіндік беретінімен айқындалады. Зерттеудің мақсаты – Қазақстанның жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру жүйесіндегі цифрлық трансформацияның жай-күйін зерттеу және жасанды интеллектіні енгізудің ерекшеліктерін бағалау.

Осы мақсатқа қол жеткізу үшін мынадай міндеттер жүзеге асырылды: университеттердің цифрлық жетілу деңгейін анықтау, нормативтік-құқықтық базаны, цифрландырудың жоғары оқу орындарының экономикалық тұрақтылығына және олардың нарықтық позицияларына әсерін талдау ондай-ақ цифрландыру жолындағы негізгі кедергілер мен мүмкіндіктерді қарастыру. Зерттеу объектісі ретінде Қазақстанның жоғары оқу орындарының қызметі алынып, зерттеу пәні – олардың цифрландыруға және жасанды интеллектіні интеграциялауға бағытталған тәсілдері болып табылады. Зерттеу әдіснамасы стратегиялық құжаттарды контент-талдау, ресми статистикалық деректерді сандық өңдеу және салыстырмалы талдау әдістеріне негізделген.

Зерттеу нәтижелері Қазақстан университеттерінің цифрлық жетілу деңгейінің қазіргі уақытта «орташа» деңгейде екенін көрсетті. Жасанды интеллектіні енгізу операциялық шығындарды оңтайландыруға және білім беру қызметтерінің экспорттық әлеуетін арттыруға ықпал ететіні анықталды. Цифрлық технологияларды енгізудің ең тиімді тәсілі – технологиялық инфрақұрылымды дамытумен қатар академиялық ортадағы цифрлық құзыреттіліктерді жүйелі түрде арттыруға бағытталған кешенді трансформация әдісі болып табылады. Университеттердің қызметін жетілдіруге арналған ұсыныстар ретінде оқытушылардың жасанды интеллект құралдарымен жұмыс істеу дағдыларын дамытуға бағытталған кәсіби қайта даярлау бағдарламаларын енгізу, IT-инфраструктураны қаржыландыру үшін мемлекеттік-жекеменшік әріптестік тетіктерін әзірлеу және инновациялық экожүйені институционалдық қолдауды қамтамасыз ету қажеттілігі негізделген.

Түйін сөздер: жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру жүйесі, цифрландыру, жасанды интеллект, Қазақстан, жаһандық бәсекеге қабілеттілік.

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ КАЗАХСТАНА: ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

[1]З.Т. Торебекова✉, [2]Б.Н. Бокаев, [3]А.Д. Бактияров, [1]Н.Б. Айжарыков

[1]Алматы менеджмент университет, Алматы, Казахстан,
[2] Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан,
[3] Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
e-mail: zttemirkhan@gmail.com

Актуальность темы исследования определяется тем, что стремительное развитие цифровых технологий и искусственного интеллекта (ИИ) радикально меняет образовательные и управленческие

процессы в высших учебных заведениях, создавая возможности для повышения их глобальной конкурентоспособности. Цель исследования – изучить состояние цифровой трансформации в системе высшего и послевузовского образования Казахстана и оценить особенности внедрения искусственного интеллекта.

Для достижения данной цели были реализованы следующие задачи: определение уровня цифровой зрелости университетов, анализ нормативно-правовой базы, оценка влияния цифровизации на экономическую устойчивость вузов и их рыночные позиции, а также рассмотрение ключевых барьеров и возможностей на пути цифровой трансформации. Объектом исследования является деятельность высших учебных заведений Казахстана, а предметом исследования – подходы к их цифровизации и интеграции искусственного интеллекта. Методология исследования основана на применении методов контент-анализа стратегических документов, количественной обработки официальной статистики и сравнительного анализа.

Результаты исследования показали, что уровень цифровой зрелости казахстанских университетов в настоящее время находится на среднем уровне. Выявлено, что внедрение искусственного интеллекта способствует оптимизации операционных затрат и повышению экспортного потенциала образовательных услуг. Наиболее эффективным подходом к внедрению цифровых технологий является метод комплексной трансформации, направленный на системное повышение цифровых компетенций в академической среде параллельно с развитием технологической инфраструктуры. В качестве рекомендаций по совершенствованию деятельности университетов обоснована необходимость внедрения программ профессиональной переподготовки преподавателей по работе с инструментами ИИ, разработки механизмов государственно-частного партнерства для финансирования IT-инфраструктуры и обеспечения институциональной поддержки инновационной экосистемы.

Ключевые слова: система высшего и послевузовского образования, цифровизация, искусственный интеллект, Казахстан, глобальная конкурентоспособность.

DIGITALIZATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE AS A FACTOR IN ENHANCING THE GLOBAL COMPETITIVENESS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS IN KAZAKHSTAN: ECONOMIC AND INSTITUTIONAL ASPECTS

[1]Z.T. Torebekova✉, [2]B.N. Bokaev, [3]A.D. Baktiyarov, [1]N.B. Aizharykov

[1]Almaty Management University, Almaty, Kazakhstan,
[2]Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan,
[3]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
e-mail: zttemirkhan@gmail.com

The relevance of this study is determined by the rapid development of digital technologies and artificial intelligence (AI), which fundamentally transform the educational and administrative processes of higher education institutions, thereby enhancing their global competitiveness. The aim of the research is to examine the current state of digital transformation in Kazakhstan's higher and postgraduate education system and to assess the features of AI implementation.

To achieve this goal, the following objectives were implemented: determining the level of digital maturity of universities, analyzing the regulatory and legal framework, assessing the impact of digitalization on the economic sustainability and market positions of higher education institutions, as well as considering key barriers and opportunities on the path to digital transformation. The research object is the activities of higher education institutions in Kazakhstan, while the research subject is the approaches to their digitalization and integration of artificial intelligence. The research methodology is based on content analysis of strategic documents, quantitative processing of official statistical data, and comparative analysis methods.

The results indicate that the digital maturity of Kazakhstan's universities is currently at an "average" level. It has been established that the integration of artificial intelligence contributes to the optimization of operational costs and the enhancement of the export potential of educational services. The most effective approach to implementing digital technologies is identified as the method of comprehensive transformation, which focuses on the systematic advancement of digital competencies within the academic environment alongside the development of technological infrastructure. As recommendations for improving university operations, the study substantiates the necessity of implementing professional retraining programs for faculty in AI tools, developing public-private partnership mechanisms for financing IT infrastructure, and ensuring institutional support for the innovation ecosystem.

Keywords: higher and postgraduate education system, digitalization; artificial intelligence, Kazakhstan, global competitiveness.

Кіріспе. Цифрлық технологиялардың қарқынды дамуына және білім экономикасының пайда болуына орай жаһандық ЖЖОКБ жүйелері ауқымды құрылымдық және мазмұндық өзгерістерге ұшырауда. Осы мәселенің өзектілігі университеттердің халықаралық білім беру нарығындағы орны олардың цифрлық әлеуеті мен жасанды интеллектіні (ЖИ) қолдану деңгейіне тікелей байланысты болуымен түсіндіріледі. Интеллектуалды ресурстар үшін жаһандық бәсекелестік жағдайында әлемдік жетекші университеттер цифрлық шешімдерді жаһандық бәсекеге қабілеттілікті нығайтуға арналған стратегиялық актив және жоғары оқу орнының материалдық емес активтерін капиталдандырудың маңызды құралы ретінде қарастырады [1].

Қазіргі жағдайда ЖЖОКБ-ның жаһандық бәсекеге қабілеттілігі олардың технологиялық өзгерістерге тез бейімделу, жоғары сапалы білім беру қызметтерін ұсыну және шекті өнімділігі жоғары, сұранысқа ие адами капиталды қалыптастыру қабілетімен анықталады. Халықаралық рейтингтер мен үлкен деректерді талдау университеттер арасындағы бәсекелестікті күшейтіп, цифрлық жетілуді білім беру мекемелерінің қаржылық тұрақтылығы мен инвестициялық тартымдылығының маңызды көрсеткіштеріне айналдыруда [2]. Осыған байланысты ЖЖОКБ-ді цифрландыру мемлекеттік саясаттың басым бағыты ретінде қарастырылуда. Осы мақсатта ұлттық цифрлық даму стратегиялары әзірленіп, ЖИ-ді білім беру және ғылыми қызметке интеграциялауды көздейтін құқықтық және институционалдық жағдайлар жасалуда, сондай-ақ инновацияларды қолдау және цифрлық құзыреттіліктерді дамыту тетіктері белгіленуде.

Бұл ретте технологиялық прогрестi ынталандыру, білім беру үдерісіне қатысушылардың құқықтарын қорғау және жасанды интеллектіні пайдаланудың этикалық қағидаттарын сақтау арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ететін нормативтік-құқықтық базалар ерекше маңызға ие. Қазақстан Республикасы үшін цифрландыру және ЖЖОКБ-ге ЖИ-ні енгізу ұзақ мерзімді ұлттық басымдықтарды жүзеге асыру және жаһандық білім беру кеңістігіне интеграциялану тұрғысынан стратегиялық маңызға ие [3]. Осыған байланысты Қазақстан үкіметі адами капиталды, инновациялық экономиканы және бәсекеге қабілетті білім беру жүйесін дамытуға бағытталған мемлекеттік бағдарламалар мен стратегиялық құжаттарда бекітілген цифрлық трансформация бағытын дәйекті түрде жүзеге асыруда.

Алайда цифрлық трансформацияның табысты болуы білім беру мекемелерінің цифрлық жетілу деңгейіне, олардың инфрақұрылымының, адами ресурстарының жағдайына және ЖИ негізіндегі шешімдерді енгізуге қажетті реттеуші және институционалдық ортаның дайындығына тікелей байланысты. Стратегиялық мақсаттар мен цифрлық бастамаларды іске асырудың практикалық тетіктері арасындағы үйлесімділіктің жеткіліксіздігі бұл шаралардың тиімділігін төмендетуі және университеттердің жаһандық бәсекеге қабілеттілігін арттыру әлеуетін шектеуі мүмкін [4].

Қазіргі кездегі ғылыми әдебиетте цифрландыру университеттердің бизнес-процестерін

оңтайландырудың және трансакциялық шығындарды төмендетудің негізгі факторы ретінде қарастырылады [5]. Экономикалық тұрғыдан цифрлық трансформация университеттердің құндылық қалыптастырудың дәстүрлі моделін түбегейлі өзгертіп, оны икемді әрі ауқымды етеді [6]. Талапкерлер жоғары технологиялармен қамтамасыз етілген ортаны таңдай отырып, университеттің репутациялық капиталы мен нарықтағы ұзақ мерзімді кірістілігінің артуына әсер етеді [1]. ЖИ құралдарын енгізу білім беру қызметтерінің білім беру өнімін терең даралауды және жоғары операциялық тиімділік деңгейін қамтамасыз етеді [7]. Бұл тәсілді цифрлық жетілу тұжырымдамасымен толықтырады, ұйымның өзгермелі цифрлық бәсекелестік ортаға бейімделу қабілетін атап көрсетеді [2].

Бұл ретте университеттерді таңдауда талапкерлер жоғары технологиялармен қамтамасыз етілген білім беру үдерісіне басымдық береді [8]. Осыған байланысты университет басшылары студенттердің тәжірибесін жақсартуды цифрлық трансформацияның негізгі нәтижесі ретінде қарастыруы тиіс [9]. Студенттердің қанағаттануы университеттің беделін және білім беру нарығындағы тартымдылығын арттырады, сондай-ақ бұл бәсекелестік артықшылықтың дамуына ықпал етеді [1].

Зерттеулерге сәйкес цифрландырудың басты мүмкіндіктерінің бірі – білімге қолжетімділікті кеңейту және институционалдық икемділікті арттыру [10]. Сонымен қатар әкімшілік және білім беру үдерістерін автоматтандыру институционалдық процестердің ашықтығы мен тиімділігін қамтамасыз етеді [7]. Жалпы алғанда цифрландыру қызмет көрсету сапасы мен пайдаланушы тәжірибесін жақсартып, университеттердің бәсекеге қабілеттілігін арттырады [11].

ЖИ-ге келер болсақ, қазіргі зерттеушілер ЖИдің университеттердің білім беру қызметін кешенді түрде жетілдіру әлеуетіне ден қоюда [12,13]. ЖИ білім беру деректерін талдаудан бастап, білім алу дербестігіне дейінгі кең ауқымды міндеттерді іске асырады [14]. Алайда зерттеулер ЖИ-дің академиялық жетістіктерге әсері контекстке байланысты екенін атай келе, университеттердің бәсекеге қабілеттілігін арттыруға қабілеттілігін ең маңызды стратегиялық ресурс деп айқындайды [15].

Осы орайда цифрлық инфрақұрылымның жеткіліксіздігі және ақпараттық жүйелердің фрагменттілігі цифрлық бастамалардың тиімділігіне кері әсер етеді [16]. Демек цифрландыру мен ЖИ-ді енгізу өздігінен университеттердің бәсекелестік артықшылықтарына кепілдік бермейді [17].

Қазақстандық зерттеушілер ЖЖОКБ-ны цифрландыруды олардың бәсекеге қабілеттілігін арттырудың негізгі факторы ретінде қарастырады. Университеттердің білім беру процестерін жаңғыртуға, қолжетімділігін кеңейтуге және инновациялық әлеуетін нығайтуға цифрлық технологиялардың ықпал ететіні көрсетіледі [18]. Сонымен қатар цифрландыруды қолдану білім беру сапасына және университеттердің беделіне елеулі әсер ететіні анықталған [19].

Жасанды интеллектіні қолдану тұрғысынан оқуды дербестендіру мен аналитикалық шешімдер арқылы жаңа оқыту талаптарына бейімделу қабілеті артады [20]. ЖИ-ді ұтымды пайдалану оқытушылардың цифрлық құзыреттіліктерін жүйелі түрде дамытуға және үйлестірілген стратегия қалыптастыруға мүмкіндік береді, бұл университеттердің бәсекеге қабілеттілігінің орнықты өсуіне оң әсер етеді [4]. Бұл өз кезегінде университеттердің бәсекеге қабілеттілігінің тұрақты өсуіне оң ықпалын тигізеді. Осылайша, шетелдік және қазақстандық зерттеулер цифрландыру және ЖИ енгізу университеттердің бәсекеге қабілеттілігінің маңызды құрамдас бөліктері екенін растайды.

Осы орайда, Қазақстанның ЖЖОКБ жүйесіне ЖИ мен цифрландыруды енгізуге қолайлы құқықтық және институционалдық ортаның қалыптасуын кешенді талдаудың өзектілігі артуда. Бұл мақаланың мақсаты - Қазақстанның жоғары оқу орындарының жаһандық бәсекеге қабілеттілігін арттыру факторлары ретіндегі цифрлық технологиялар мен ЖИ-ды пайдаланудың негізгі шарттарын, шектеулерін және мүмкіндіктерін анықтау, сондай-ақ ЖЖОКБ мемлекеттік саясат пен басқару тәжірибесін жетілдіру жөніндегі ғылы-

ми негізделген ұсыныстарды тұжырымдау болып табылады.

Зерттеу нысаны - Қазақстанның жоғары оқу орындары жүйесі. *Зерттеу пәні* - жоғары білім беру саласындағы цифрландыру және жасанды интеллект технологияларын енгізу процестері.

Зерттеудің мақсаты - қазақстандық жоғары оқу орындарының жаһандық бәсекеге қабілеттілігін арттыру факторлары ретіндегі цифрлық технологиялар мен жасанды интеллектіні (ЖИ) пайдаланудың негізгі шарттарын, шектеулерін және мүмкіндіктерін анықтау, сондай-ақ мемлекеттік саясат пен басқару тәжірибесін жетілдіру жөніндегі ғылыми негізделген ұсыныстарды тұжырымдау болып табылады.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу әдіснамасы Қазақстан Республикасының жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру (ЖЖОКБ) жүйесінде цифрландыру мен жасанды интеллектіні (ЖИ) енгізудің құқықтық және институционалдық ортасын бағалауға бағытталды. Зерттеу Қазақстанның жоғары білім беру саласындағы мемлекеттік саясаттың мазмұнын және университеттердің жаһандық бәсекеге қабілеттілігін арттыру шарттарын айқындауға мүмкіндік беретін сапалық және сандық дереккөздерге негізделді.

Зерттеу гипотезасы ЖИ-ді жүйелі түрде интеграциялау жоғары оқу орны ресурстарының аллокативті тиімділігін (ресурстарды тиімді бөлуді) арттырып, оның жаһандық нарықтағы тұрақты бәсекелестік артықшылықтарының орнықты өсуіне ықпал етеді деген болжамға негізделді.

Зерттеудің негізгі сұрағы Қазақстанның ЖЖОКБ жүйесінде цифрландыру мен жасанды интеллектіні енгізудің қандай құқықтық және институционалдық шарттары университеттердің жаһандық бәсекеге қабілеттілігін арттырады деген мәселені қамтыды. Зерттеу гипотезасы университеттердің цифрлық жетілу деңгейі мен жасанды интеллектіні жүйелі түрде интеграциялау олардың институционалдық тиімділігін арттырып, халықаралық білім беру кеңістігіндегі тартымдылығы мен бәсекеге қабілеттілігінің орнықты өсуіне ықпал етеді деген болжамға негізделді.

Зерттеу материалы ретінде ЖЖОКБ саласын цифрландыру мен жасанды интеллектіні дамытуға қатысты нормативтік-құқықтық актілер, мемлекеттік бағдарламалар мен стратегиялық құжаттар, сондай-ақ уәкілетті мемлекеттік органдардың ресми статистикалық деректері пайдаланылды. Талдауға жасанды интеллектіні дамыту тұжырымдамалары, жоғары білім беру жүйесінің цифрлық трансформациясына арналған стратегиялық құжаттар, сондай-ақ білім беру үдерісінде жасанды интеллектіні қолданудың институционалдық және этикалық аспектілерін айқындайтын материалдар енгізілді. Зерттеу материалы сапалық тұрғыдан құжаттардың мазмұнын, ал сандық тұрғыдан білім беру бағдарламаларына жасанды интеллектіні енгізу көрсеткіштерін және цифрлық бастамалардың қамтылу ауқымын сипаттады.

Зерттеу бірнеше кезеңде жүзеге асырылды. Бірінші кезеңде цифрландыру мен жасанды интеллектінің жоғары білім беру жүйесіндегі рөліне қатысты ғылыми тұжырымдамалар зерделенді. Келесі кезеңде нормативтік және стратегиялық құжаттарға жүйелі талдау жүргізіліп, институционалдық алғышарттар айқындалды. Қорытынды кезеңде цифрлық инфрақұрылым мен білім беру бастамаларына, соның ішінде AI-Sana акселерациялық платформасына қатысты мәліметтер талданып, университеттердің білім беру қызметіне жасанды интеллектіні интеграциялаудың ағымдағы деңгейі бағаланды.

Зерттеу барысында контент-талдау, жүйелік және салыстырмалы талдау әдістері қолданылды. Алынған нәтижелер Қазақстанның ЖЖОКБ жүйесінде цифрландыру мен жасанды интеллектіні енгізудің құқықтық және институционалдық негіздерін жүйелеуге, сондай-ақ университеттердің жаһандық бәсекеге қабілеттілігін арттыруға ықпал ететін негізгі факторларды айқындауға мүмкіндік берді.

Нәтижелер және талқылау. Соңғы жылдары Қазақстан Республикасындағы ЖЖОКБ цифрландыру білім беру процесінде ЖИ-ді енгізуді институционалдандыруға бағытталған жүйелі

мемлекеттік саясат аясында дамып келеді. Бұл бағыттағы маңызды қадамның бірі - 2024 жылы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің ЖЖОКБ-де жасанды интеллектті қолданудың стандартын әзірлеуі болды. Осының негізінде бірыңғай нормативтік және әдістемелік нұсқаулықтар белгіленді [21]. Аталмыш стандартта ЖИ-ді қолданудың этикалық аспектілеріне, оның ішінде академиялық тұтастыққа, алгоритмдік ашықтыққа және жеке деректерді қорғауға ерекше мән беріледі. Осы тұрғыда университетаралық стандарт цифрлық инновацияны ынталандыру, дербес оқу мен сыни ойлауды қоса алғанда, ЖЖОКБ-ның негізгі қағидаттарын сақтауға қатысты теңгерімді механизм қызметін атқарады.

Бұл ретте, көрсетілген шаралар Қазақстанда ЖИ технологияларын дамытудың кең ауқымды мемлекеттік стратегиясымен тұспа тұс келгенін атап кету қажет. Мысалы, Қазақстанда ЖИ дамытудың 2024–2029 жылдарға арналған тұжырымдамасы бұл технологияны экономикалық өсудің негізгі драйвері және ұлттық адами капиталды жаңғырту факторы ретінде анықтады [22]. Сонымен қатар, елімізде ЖИ саласында қабылданып жатқан стратегиялық шараларының маңызды нәтижелерінің қатарына ЖИ саласындағы білім беру бағдарламаларының әзірленуін жатқызуға болады. Бүгінгі таңда қазақстандық университеттер қолданбалы ЖИ, деректерді талдау, кибернетика, медицинадағы жасанды интеллект, ақылды технологиялар және пәнаралық инженерлік шешімдер сияқты салаларды қамтитын жиырмадан астам мамандандырылған бағдарламаларды қолданысқа енгізген. ЖИ-ге қатысты пәндер елдің көптеген университеттеріне интеграцияланған және бұл білім беру бағдарламаларының цифрлық трансформациясының ауқымдылығын дәлелдейді [23].

Алайда, ЖЖОКБ-ді цифрландыру бірқатар құрылымдық қиындықтармен қатар жүретінін назарда ұстау маңызды. Осы бағыттағы негізгі шектеулердің бірі - оқытушылардың цифрлық және педагогикалық құзыреттіліктерінің жеткіліксіздігі болып табылады. Бұның салдары білім берудегі ЖИ әлеуетін толық жүзеге асыра алмаумен байланысты. Осыған орай, ЖИ-ді пайдалануға бағытталған кәсіби даму бағдарламаларын кеңінен дамыту маңызды. Қазіргі кезде жүргізілеп жатқан шаралардың басты мақсаты - университеттердің цифрлық экономикада жұмыс істеуге институционалдық дайындығын арттыру [24].

Білім берудегі цифрландыру экожүйесін қалыптастырудың тағы бір маңызды элементі - AI-Sana бағдарламасы сияқты инновациялық және жеделдету бастамаларын іске асыру болып табылады. Мұндай жобалар білім беру процесін ЖИ саласында жүргізіліп жатқан ғылыми зерттеулермен және практикалық әзірлемелермен біріктіруге, студенттер мен жас зерттеушілердің қолданбалы құзыреттіліктерін дамытуға ықпал етуді көздейді [25].

Сондай-ақ, цифрлық және ЖИ технологияларын тиімді қолдану жолында тиісті цифрлық әлеуеттің қалыптасуы аса маңызды. Қазіргі кезде қазақстандық ЖЖОКБ ұйымдарының (ЖЖОКБҰ) цифрлық жетілу деңгейін бағалау мақсатында Ғылым және жоғары білім министрлігінің 2024 жылғы 14 тамыздағы №408 бұйрығымен Жоғары және/немесе жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру ұйымдарының цифрлық жетілу деңгейін анықтау жөніндегі әдістемелік ұсыныстары бекітілген [3]. Бұл құжат цифрлық жетілуді бағалаудың базалық, орта, жоғары және көшбасшылық сияқты 4 деңгейін мен бес негізгі компонентін анықтайды: инфрақұрылым мен жабдықтау, цифрлық платформаларды интеграциялау, білім беру процесінде жасанды интеллектті пайдалану, оқытушылар мен студенттердің цифрлық құзыреттіліктері және инновациялық білім беру ортасы.

Осы ретте, цифрлық жетілудің негізгі алғышарттарының қатарында тиісті инфрақұрылым мен құрал-жабдықтардың болуы бар. Эмпирикалық зерттеулерге сүйенсек, бүгінде еліміздегі мегаполистік және өңірлік университеттер арасындағы цифрландыру деңгейінде теңгерімсіздік сақталып отыр. Зерттеу нәтижелері өңірлік және орталық жоғары оқу орындары арасында цифрлық алшақтық (digital divide) бар екенін көрсетті, бұл білім беру қызметтері нарығын-

дағы экономикалық пайданың біркелкі бөлінбеуіне және нарықтың сегменттелуіне әкеледі. Компьютерлік парктің 95%-ы интернетке қосылғанымен, оқытушылардың 50%-ында мамандандырылған цифрлық құзыреттіліктер тапшылығы байқалады, бұл IT-инфрақұрылымға салынған инвестициялардың қайтарымдылығын (ROI) тежейді [4]. Халықаралық тәжірибе көрсеткендей, ЖИ-ді стратегиялық басқаруға енгізу әкімшілік шығыстарды 15-20%-ға азайтып, білім беру процесінің автономиясы мен рентабельділігін арттырады [14].

Осы саладағы басқа да зерттеулерге қатысқан студент-респонденттердің 26,5%-ы отандық университеттердегі цифрлық инфрақұрылымды «орташа», 16% - «нашар» және 18,3% - «орташадан жоғары»/«өте жақсы» деп бағалаған. Студенттердің басым бөлігі (66,2%) ЖИ құралдарын оқу барысында тұрақты пайдаланатынын хабарлаған. Жалпы алғанда зерттеу нәтижелері ЖЖОКБҰ-дағы цифрландыру мен ЖИ-ні енгізу деңгейін «орташа» деп қорытындылаған [4]. ҚР Стратегиялық зерттеулер институтының талдауында қазақстандық студенттердің 76%-ға жуығы білім алу барысында ЖИ-ге тұрақты жүгінетінін, сондай-ақ оқытушылардың (шамамен 51%) ЖИ құралдарын аналитика жасау және бағалау барысында қолданатынын анықталған [26].

Халықаралық зерттеулер, мысалы, Ұлыбритания жағдайында жүргізілген зерттеулер ел аумағында ЖИ-ді белсенді қолданатын студенттердің үлесі 2024 жылғы 66%-дан 2025 жылы 92%-ға дейін өскенін көрсеткен [27]. Бұған қоса, АҚШ-тың жетекші университеттері ЖИ құралдарын білім беру үрдісін стратегиялық басқаруда белсенді пайдаланады [28]. Американдық элиталық колледж студенттерінің 80%-дан астамы ЖИ-ді материалды түсіндіру және күнделікті оқу тапсырмаларын орындау үшін ұдайы қолданады [29].

Цифрлық жетілудің тағы бір көрсеткіші – цифрлық құзыреттіліктің қалыптасуы болып табылады. Осы тұста, қазақстандық оқытушылардың цифрлық құзыреттіліктерінің деңгейін бағалаған зерттеулердің қорытындысына сәйкес, оқытушылардың 50%-ға жуығы цифрлық және ЖИ құралдарын белсенді пайдалануға қабілетті болса, қалған бөлігі тек базалық цифрлық дағдыларға ие. Ғалымдардың пікірінше, бұл шектеулерді жою үшін мамандандырылған кәсіби даму бағдарламалары және халықаралық университеттермен тәжірибе алмасулар қажет. Қазіргі таңда цифрлық құзыреттіліктерді дамыту негізінен ЖЖОКБҰ-ның басшыларын университеттерді цифрлық трансформацияға дайындау бағдарламалары аясында жүзеге асырылады [30]. Қазақстандық ЖЖОКБҰ-ғы цифрлық құзыреттіліктің жеткіліксіздігі, ЖИ-дің бөлшектенген интеграциясының, институционалдық қолдаудың кемшілігінен туындайтын салдар деп анықталған [19]. Бұған қоса, оқытушылардың цифрлық құзыреттілігі LMS жабдықтарының жеткіліксіздігі және ауқымды аналитикалық қызметтерге қолжетімділіктің шектеулілігі себебінен дамымай отыр [4].

Халықаралық тәжірибеде, мысалы Австралияның ЖЖОКБҰ-лары цифрлық жетілудің жетекші деңгейіне стратегиялық жоспарлау, ЖИ-ді білім беру және басқару процестеріне кешенді интеграциялау, тәуекелдерді басқару және инновацияларды жүйелік қолдау арқылы қол жеткізген. ЖИ-ды жүйелі пайдалану шетелдік оқу орындарында білім алу уақытын шамамен 27%-ға қысқартуға және оқу процесінің дербестігін арттыруға мүмкіндік берген [1]. Сондай-ақ, шетелдік зерттеушілер ЖИ-ді пайдаланудың этикалық тұстарын академиялық тұтастықпен теңдестірудің маңыздылығын да атап көрсеткен [27].

Осылайша, жүргізілген талдау қазақстандық ЖЖОКБҰ-дың цифрлық жетілуін ішінара бағалауға мүкіндік берді. Мұндағы көрсеткіштер ретінде тиісті зерттеулерде анықталған және ресми жарияланған деректер алынған. Нәтижесінде, бүгінгі таңдағы қазақстандық университеттердің цифрлық жетілу деңгейін орташа деп бағалауға болады.

Төмендегі 1-кестеде көрсетілгендей, қазақстандық университеттердің цифрлық кемелдік деңгейі бес негізгі компонент бойынша «орташа» деп бағаланады.

1-кесте. Эмпирикалық деректер мен халықаралық көрсеткіштер негізінде Қазақстан университеттерінің цифрлық жетілуін бағалау

Компонент	Қазақстан (эмпирикалық деректер)	Жетілу деңгейі	Экономикалық маңызы	Халықаралық бағдарлар
Инфрақұрылым және жабдықтар	83 000 компьютер, оның 79 000 интернетке қосылған	Орта	Бұлтты есептеулер арқылы CAPEX пен OPEX-ті (күрделі және операциялық шығындарды) оңтайландыру	Жоғары өнімді есептеулерді (HPC) интеграциялау
Оқу процесінде жасанды интеллектіні қолдану	Студенттердің 76%-ы ЖИ қолданады; оқытушылардың 51%-ы	Орта	Дербестендіру – клиенттің (студенттің) өмірлік құндылығын (LTV) арттыру құралы ретінде	Бейімделген оқыту (Adaptive learning) жүйелерінің толық циклі
Оқытушылардың цифрлық құзыреттері	50% жуығы базалық цифрлық құзыреттерге ие	Орта	ЖИ-құзыреттіліктері болмаған жағдайда адами капиталдың құнсыздану (девальвация) тәуекелі	Үздіксіз даму (CPD) және ЖИ-сертификаттау
Инновациялық білім беру ортасы	Пилоттық жобалар, акселерациялық бағдарламалар (AI-Sana)	Орта	Зияткерлік меншікті (IP) коммерцияландыру	Технологиялық кәсіпкерлік экожүйесі

Сонымен қатар, жүргізілген зерттеу нәтижелері қазіргі кезде қазақстандық ЖЖОКБ жүйесіне цифрлық трансформацияны ұтымды іске асыруға қажетті нормативтік-құқықтық базаның жеткілікті түрде қалыптасқанын көрсетті. ЖИ-ды дамытудың ұлттық тұжырымдамасының және университетаралық стандарттардың әзірленуі ЖИ кіріктірілген білім беру бағдарламаларының ауқымын кеңейтуге және ЖЖОКБҰ-ны тұрақты цифрландыруға негіз береді. Алайда, осы процестердің тиімділігі нормативтік талаптарды енгізу сапасына, оқытушылар құрамының дайындық деңгейіне және этикалық стандарттардың сақталуына тікелей байланысты.

Қорытынды. Осы зерттеудің мақсаты Қазақстанның жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру жүйесінде цифрлық технологиялар мен жасанды интеллектіні (ЖИ) пайдаланудың университеттердің жаһандық бәсекеге қабілеттілігіне әсерін анықтау болды. Зерттеу нәтижелері қазақстандық университеттерде цифрлық трансформация процесі қалыптасу және орташа деңгейдегі жетілу кезеңінде екенін көрсетті. Базалық цифрлық инфрақұрылым болса да, цифрлық технологиялар мен ЖИ-ді институционалдық дамудың стратегиялық ресурсы ретінде кешенді пайдалану жеткіліксіз деңгейде қалып отыр [4].

Сонымен қатар, жүргізілген зерттеу қазақстандық университеттердің цифрлық трансформациясы ресурстарды экстенсивті жинақтау кезеңінде екенін көрсетті. Бәсекеге қабілеттілікті нығайту үшін цифрландырудың интенсивті моделіне көшу қажет. Бұл модель университеттердің институционалдық орнықтылығын арттыруға, білімді тиімді монетизациялауға және ЖЖОКБ жүйесін экономикалық трансформацияның локомотивіне айналдыруға бағытталуы тиіс.

Эмпирикалық деректер университеттер арасында жасанды интеллектіге негізделген шешімдерді енгізу деңгейінің біркелкі еместігін және цифрлық құзыреттіліктердің дамуы бойынша

асимметрияның бар екенін көрсетеді. Бұл адами капиталды мақсатты түрде дамыту және цифрлық жетілуді басқаруда жүйелі тәсіл қалыптастыру қажеттілігін айқындайды [30; 4]. Шетелдік тәжірибе ЖИ технологияларының білім беру, ғылыми-зерттеу және әкімшілік үдерістерге тікелей интеграциялануы университеттердің беделін арттыруға оң әсерін тигізетінін растайды [27].

Осыған байланысты Қазақстан университеттерінің жаһандық бәсекеге қабілеттілігін арттыру үшін жекелеген цифрлық бастамалардан институционалдық цифрлық трансформация моделіне көшу қажет. Бұл модель оқытушылар мен әкімшілік персоналдың цифрлық құзыреттіліктерін жүйелі дамытуға, басқарушылық шешімдер қабылдауда ЖИ негізіндегі аналитикалық жүйелерді енгізуге, сондай-ақ цифрлық технологияларды білім сапасын арттыру, ғылыми зерттеу өнімділігін жоғарылату және университет қызметін халықаралық стандарттарға сәйкестендіру мақсатында пайдалануға бағытталуы тиіс [4; 27].

Зерттеу нәтижелері жоғары білім беру саласындағы мемлекеттік саясатты жетілдіруде және университеттердің стратегиялық даму бағдарламаларын әзірлеуде практикалық маңызға ие. Болашақ зерттеулер жасанды интеллектіні пайдаланудың ұлттық стандарттарын әзірлеуге, этикалық және құқықтық реттеуді жетілдіруге, сондай-ақ қазақстандық университеттердің цифрлық жетілудің жоғары деңгейлеріне көшу жолдарын эмпирикалық тұрғыдан зерделеуге бағытталуы мүмкін [13].

Қаржыландыру. *Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (BR28712521).*

Әдебиеттер

1. George B., & Wooden O. Managing the Strategic Transformation of Higher Education through Artificial Intelligence// Administrative Sciences. -2023.- Vol.13(9). -P.196. DOI 10.3390/admsci13090196.

2. Kane G. C. Digital maturity, not digital transformation// MIT Sloan Management Review. -2017.- Vol.1(1). -P.1–15. URL: https://sloanreview.mit.edu. - Date of access: 06.01.2026.

3. Zakon.kz. Қазақстан Республикасының Жоғары және (немесе) жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру ұйымдарының цифрлық жетілу деңгейін айқындау жөніндегі әдістемелік ұсынымдарды бекіту туралы// Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрінің міндетін атқарушының 2024 жылғы 14 тамыздағы № 408 бұйрығы. -2024. - URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=34078184. -Қаралған күні: 06.01.2026.

4. Джанегизова А., Huong Lan D., & Чуланова З. Цифровая трансформация высшего образования в Казахстане: проблемы и решения// Статистика, учет и аудит. - 2025. -Т.3(98). - С.249-263.DOI 10.51579/1563–415.2025.-3.18.

5. Antonopoulou K., Begkos C., & Zhu Z. Staying afloat amidst extreme uncertainty: A case study of digital transformation in higher education// Technological Forecasting & Social Change. -2023.- Vol.192:122603. DOI 10.1016/j.techfore.2023.122603.

6. Hess T., Matt C., Benlian A., & Wiesböck F. Options for formulating a digital transformation strategy. MIS Quarterly Executive. -2016.- Vol.15(2). -P.123-139. URL: https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1335&context=misqe. Date of access: 06.01.2026.

7. Shrivastava S. K., & Shrivastava C. New reforms in Indian higher education: Rethinking the education model//Indian Journal of Social Science and Literature. -2024.-Vol.4(1). -P.42-48.
DOI 10.54105/ijssl.E1142.04010924.

8. Yesner R. The Future of Higher Education: Digital Transformation Is Critical to Learner and Institution Success// IDC.-2020.-URL:

https://www.ecampusnews.com/files/2020/10/IDC_The-Future-of-Higher-Education.pdf -Date of access: 06.01 2026.

9. Stokes P., Baker N., DeMillo R., Soares L., & Yaeger L. The transformation-ready higher education institution. Huron; American Council of Education; Georgia Institute of Technology. -2019.- URL: https: //share.google/wbxeAYP6ZYMYlnZSn.- Date of access: 06.01 2026.

10. Rodríguez D., Arias P., & Jimenez M. Use of virtual resources for the development of spatial vision in high school students//Cadernos de Educação Tecnologia e Sociedade. -2023.- Vol.16(3). DOI 10.14571/brajets.v16.n3.473-489.

11. Yureva O. V., Burganova L. A., Kukushkina O. Y., Myagkov G. P., & Syradoev D. V. Digital transformation and its risks in higher education: Students' and teachers' attitude//Universal Journal of Educational Research.-2020.-Vol.8(11B).-P.5965-5971. DOI 10.13189/ujer.2020.082232.

12. Wang S., Wang F., Zhu Z., Wang J., Tran T., & Du Z. Artificial intelligence in education: A systematic literature review//Expert Systems with Applications. -2024.- Vol.252:124167.
DOI 10.1016/j.eswa.2024.124167.

13. Bond M., Khosravi H., De Laat M., et al. A meta systematic review of artificial intelligence in higher education: A call for increased ethics, collaboration, and rigour//International Journal of Educational Technology in Higher Education. -2024.-Vol.21:4. DOI 10.1186/s41239-023-00436-z.

14. Boussouf Z., Amrani H., Zerhouni Khal M., & Daidai F. Artificial intelligence in education: A systematic literature review// Data and Metadata. -2024.- Vol.3: 288. DOI 10.56294/dm2024288.

15. Tlili A. Can artificial intelligence (AI) help in computer science education? A meta-analysis approach// Revista Española de Pedagogía. -2024. DOI 10.22550/2174-0909.4172.

16. Thoring A., Rudolph D., & Vogl R. Digitalization of higher education from a student's point of view//European Journal of Higher Education IT. -2017.- Vol.47.-P.1-10. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Digitalization-of-Higher-Education-from-a-Student-%E2% 80%99-Thoring-Rudolph/0da7cba8d0eaeb81cbbfe792637d0983365e6d46.- Date of access: 06.01 2026.

17. Bleeker A., & Crowder R. Selected online learning experiences in the Caribbean during COVID-19//Studies and Perspectives Series-ECLAC. United Nations. -2022.-No.105.
URL:https://hdl.handle.net/11362/47742. - Date of access: 06.01 2026.

18. Нахбаева Г. С., Нуртазина Р. А., & Кайдарова А. С. Цифровая трансформация вузов в Казахстане: результаты глубинных интервью с экспертами// Адам әлемі. -2025.- *Т.1*(103).- С.101-112. DOI 10.48010/aa.v103i1.724.

19. Мусина С. К. Применение цифровых инструментов в управлении высшими учебными заведениями Казахстана// Управление образованием. -2024.- Т.14(8–1). - С.278-285.

20. Бекманова Г.Т., Кантуреева М.А., Омарбекова А.С., Ергеш Б. Ж., & Закирова А.Б. Жоғары білім беруде жасанды интеллектіні қолдану және әсерін бағалау// Academic Scientific Journal of Computer Science. -2025.- Т.2.-№354.- С.61-73. DOI 10.32014/2025.2518-1726.344.

21. Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан. Межвузовский стандарт по применению искусственного интеллекта в высшем и послевузовском образовании.-2024.-URL: https://enic-kazakhstan.edu.kz. Дата обращения: 06.01.2026.

22. Үкімет Жасанды интеллектіні дамытудың 2024-2029 жылдарға арналған тұжырымдамасын қабылдады.URL: https://primeminister.kz. -Қаралған күні: 06.01.2026.

23. Inform.kz. ИИ в образовании: 95 вузов Казахстана интегрировали новые дисциплины.-2025.-URL:https://www.inform.kz/ru/

ii-v-obrazovanii-95-vuzov-kazahstana-integrirovali-novie-distsiplini-f8be73. – Дата обращения: 06.01 2026.

24. Alt University. Алматыда жоғары оқу орындары басшыларына арналған «Жоғары білім беру жүйесінде жасанды интеллектіні пайдалану» бағдарламасы бойынша оқу өтті. -2025.-URL: https://alt.edu.kz .- Қаралған күні: 06.01.2026.

25. Korkyt Ata University. AI-Sana: Қазақстанда жасанды интеллект болашағын қалыптастыратын инновациялық бағдарлама. -2025.-URL: https://korkyt.edu.kz/article/1806.- Қаралған күні: 06.01.2026.

26. ҚСЗИ. Қазақстандықтар көбінесе цифрлық құралдарды оқу үрдісі мен өзін-өзі дамыту үшін пайдаланады – ҚСЗИ әлеуметтанулық сауалнамасы. -2025.- URL: https://kisi.kz .- Қаралған күні: 06.01.2026.

27. Heppi. AI and the Future of Universities. -2025.-URL: https://www.hepi.ac.uk/reports/right-here-right-now-new-report-on-how-ai-is-transforming-higher-education/.- Date of access: 06.01 2026.

28. Duke University. AI at Duke. URL: https://ai.duke.edu/.- Date of access: 06.01 2026.

29. Contractor S., & Reyes M. Generative AI in Higher Education: Evidence from an Elite College// Higher Education & Technology Review. -2025.- Vol.12(1).- P.77–94. DOI 10.48550/arXiv.2508.00717.

30. Moldashev K., & Sakhimbekov B. Determinants of teachers' adoption of artificial intelligence: Evidence from Kazakhstan// Eurasian Journal of Economic and Business Studies.- 2025.DOI 10.47703/ejebs.v69i4.565.

References

1. George B., & Wooden O. Managing the Strategic Transformation of Higher Education through Artificial Intelligence// Administrative Sciences. -2023.- Vol.13(9). -P.196. DOI 10.3390/admsci13090196.

2. Kane G. C. Digital maturity, not digital transformation// MIT Sloan Management Review. -2017.- Vol.1(1). -P.1–15. URL: https://sloanreview.mit.edu/article/digital-maturity-not-digital-transformation. - Date of access: 06.01.2026.

3. Zakon.kz. Қazaқstan Respublikasynyң Zhoғary zhәne (nemese) zhoғary oқu ornynan kejingi bilim beru ұjymdarynyң cifrlyқ zhetilu deңgejin ajқyndau zhөnindegi әdistemelik ұsynymdardy bekitu turaly// Қazaқstan Respublikasy Fylym zhәne zhoғary bilim ministrinің mindetin atқarushynyң 2024 zhylғy 14 tamyzdaғy № 408 bұjryғy. -2024. - URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=34078184.- Қaralған kүni: 06.01.2026. [in Kazakh]

4. Dzhanegizova A., Huong Lan D., & Chulanova Z. Cifrovaja transformacija vysshego obrazovanija v Kazahstane: problemy i reshenija// Statistika, uchet i audit. - 2025. -T.3(98). - S. 249-263.DOI 10.51579/1563-415.2025.-3.18.[in Russian]

5. Antonopoulou K., Begkos C., & Zhu Z. Staying afloat amidst extreme uncertainty: A case study of digital transformation in higher education// Technological Forecasting & Social Change. -2023.- Vol.192:122603. DOI 10.1016/j.techfore.2023.122603.

6. Hess T., Matt C., Benlian A., & Wiesböck F. Options for formulating a digital transformation strategy. MIS Quarterly Executive. -2016.- Vol.15(2). -P.123-139. URL: https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1335&context=misqe. Date of access: 06.01.2026.

7. Shrivastava S. K., & Shrivastava C. New reforms in Indian higher education: Rethinking the education model//Indian Journal of Social Science and Literature. -2024.-Vol.4(1). -P.42-48.

DOI 10.54105/ijssl. E1142.04010924.

8. Yesner R. The Future of Higher Education: Digital Transformation Is Critical to Learner and Institution Success// IDC.-2020.-URL: https://www.ecampusnews.com/files/2020/10/IDC_The-Future-of-Higher-Education.pdf -Date of access: 06.01 2026.

9. Stokes P., Baker N., DeMillo R., Soares L., & Yaeger L. The transformation-ready higher education institution. Huron; American Council of Education; Georgia Institute of Technology. -2019.- URL: https: //share.google/wbxeAYP6ZYMYlnZSn.- Date of access: 06.01 2026.

10. Rodríguez D., Arias P., & Jimenez M. Use of virtual resources for the development of spatial vision in high school students//Cadernos de Educação Tecnologia e Sociedade. -2023.- Vol.16(3). DOI 10.14571/brajets. v16.n3.473-489.

11. Yureva O. V., Burganova L. A., Kukushkina O. Y., Myagkov G. P., & Syradoev D. V. Digital transformation and its risks in higher education: Students' and teachers' attitude//Universal Journal of Educational Research.-2020.-Vol.8(11B). -P.5965-5971. DOI 10.13189/ujer.2020.082232.

12. Wang S., Wang F., Zhu Z., Wang J., Tran T., & Du Z. Artificial intelligence in education: A systematic literature review//Expert Systems with Applications. -2024.- Vol.252:124167. DOI 10.1016/j.eswa.2024.124167.

13. Bond M., Khosravi H., De Laat M., et al. A meta systematic review of artificial intelligence in higher education: A call for increased ethics, collaboration, and rigour//International Journal of Educational Technology in Higher Education. -2024.-Vol.21:4. DOI 10.1186/s41239-023-00436-z.

14. Boussouf Z., Amrani H., Zerhouni Khal M., & Daidai F. Artificial intelligence in education: A systematic literature review// Data and Metadata. -2024.- Vol.3: 288. DOI 10.56294/dm2024288.

15. Tlili A. Can artificial intelligence (AI) help in computer science education? A meta-analysis approach// Revista Española de Pedagogía. -2024. DOI 10.22550/2174-0909.4172.

16. Thoring A., Rudolph D., & Vogl R. Digitalization of higher education from a student's point of view//European Journal of Higher Education IT. -2017.- Vol.47.-P.1-10. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Digitalization-of-Higher-Education-from-a-Student-%E2% 80%99-Thoring-Rudolph/0da7cba8d0eaeb81cbbfe792637d0983365e6d46.- Date of access: 06.01 2026.

17. Bleeker A., & Crowder R. Selected online learning experiences in the Caribbean during COVID-19//Studies and Perspectives Series-ECLAC. United Nations. -2022.-No.105. URL:https://hdl.handle.net/11362/47742. - Date of access: 06.01 2026.

18. Nahbaeva G. S., Nurtazina R. A., & Kajdarova A. S. Cifrovaja transformacija vuzov v Kazahstane: rezul' taty glubinnyh interv' ju s jekspertami// Adam әlemi. -2025.- T.1(103). - S.101-112. DOI 10.48010/aa.v103i1.724. [in Russian]

19. Musina S. K. Primenenie cifrovyh instrumentov v upravlenii vysshimi uchebnymi zavedenijami Kazahstana// Upravlenie obrazovaniem. -2024.- T.14(8-1). - S.278-285. [in Russian]

20. Bekmanova G.T., Kantureeva M.A., Omarbekova A.S., Ergesh B. Zh., & Zakirova A.B. Zhoғary bilim berude zhasandy intellektini қoldanu zhәne әserin barғalau// Academic Scientific Journal of Computer Science. -2025.- T.2.-№354.- C.61-73. DOI 10.32014/2025.2518-1726.344. [in Russian]

21. Ministerstvo nauki i vysshego obrazovanija Respubliki Kazahstan. Mezhvuzovskij standart po primeneniju iskusstvennogo intellekta v vysshem i poslevuzovskom obrazovanii. -2024.-URL: https://enic-kazakhstan.edu.kz. -Data obrashhenija: 06.01.2026.[in Russian]

22. Ykimet Zhasandy intellektini damytudyң 2024-2029 zhyldarға arnalған tұzhyrymdamasyn

қabyldady.URL: https://primeminister.kz. -Қaralған kүni: 06.01.2026.[in Kazakh]

23. Inform.kz. II v obrazovanii: 95 vuzov Kazahstana integrirovali novye discipliny.-2025.-URL: https://www.inform.kz/ru/ii-v-obrazovanii-95-vuzov-kazahstana-integrirovali-novie-distsiplini-f8be73. - Data obrashhenija: 06.01 2026. [in Russian]

24. Alt University. Almatyda zhoғary oқu oryndary basshylaryna arnalған «Zhoғary bilim beru zhүjesinde zhasandy intellektini pajdalanu» bағdarlamasy bojynsha oқu өtti. -2025.-URL: https://alt.edu.kz/zhanalyqtar/almatyda-zhoghary-oqu-oryndary-basshylaryna-arnalghan-zhoghary-bilim-beru-zhuejesinde-zhasandy-intellektini-pajdalanu-baghdarlamasy-bojynsha-oqu-oetti/.- Қaralған kүni: 06.01.2026.[in Kazakh]

25. Korkyt Ata University. AI-Sana: Қazaқstanda zhasandy intellekt bolashaғyn қalyptastyratyn innovacijalyқ bағdarlama. -2025.-URL: https://korkyt.edu.kz/article/1806.- Қaralған kүni: 06.01.2026. [in Kazakh]

26. ҚSZI. Қazaқstandyқtar kөbinese cifrlyқ құraldardy oқu үrdisi men өzin-өzi damytu үshin pajdalanady – ҚSZI әleumettanulyқ saualnamasy. -2025.- URL: https://kisi.kz .- Қaralған kүni: 06.01.2026. [in Kazakh]

27. Heppi. AI and the Future of Universities. -2025.-URL: https://www.hepi.ac.uk/reports/right-here-right-now-new-report-on-how-ai-is-transforming-higher-education/.- Date of access: 06.01 2026.

28. Duke University. AI at Duke. URL: https://ai.duke.edu/.- Date of access: 06.01 2026.

29. Contractor S., & Reyes M. Generative AI in Higher Education: Evidence from an Elite College// Higher Education & Technology Review. -2025.- Vol.12(1).- P.77–94. DOI 10.48550/arXiv.2508.00717.

30. Moldashev K., & Sakhimbekov B. Determinants of teachers' adoption of artificial intelligence: Evidence from Kazakhstan// Eurasian Journal of Economic and Business Studies.- 2025.DOI 10.47703/ejebs.v69i4.565.

Авторлар туралы мәлімет

Торебекова З.Т. - аға ғылыми қызметкер, Алматы менеджмент университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: zttemirkhan@gmail.com;

Бокаев Б.Н. - профессор, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан, e-mail: baurzhanbokayev@gmail.com;

Бактияров А.Д. - PhD докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразиялық ұлттық университет, Астана, Қазақстан, e-mail: baktiyarov.asset@gmail.com;

Айжарыков Н.Б. - Зерттеу тобының мүшесі, Алматы менеджмент университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: nblectures@gmail.com.

Information about the authors

Torebekova Z.-Senior Research Fellow, Almaty Management University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: zttemirkhan@gmail.com;

Bokayev B.- Professor, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: baurzhanbokayev@gmail.com;

Baktiyarov A. - PhD Doctoral Student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: baktiyarov.asset@gmail.com;

Aizharykov N. - Member of the Research Group, Almaty Management University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: nblectures@gmail.com.

Редактор: Оспанова М.К.
Верстка: Ундасынов Р.Е.
Подписано в печать: 30.03.2026 г.
Издание: АО «КазУТБ» 010000, Астана, Казахстан, ул. Кайыма Мухамедханова, 37 А,
Рабочий телефон: +7 (7172)72-58-12(134)
E-mail: vestnik@kaztbu.edu.kz