

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОЧИСТКИ ФОСФОРА

**Б.А. Сулейменов, Г.Т.\* Жайлымысова**

Satbayev university, Алматы, Казахстан,

e-mail: g.zhailymyssova@satbayev.university

В рыночной экономике остро встает задача внедрения систем оптимального управления технологическими процессами в цветной и черной металлургии, в химической промышленности, в нефтехимии и т.д., которые позволяют более рационально использовать минеральные ресурсы, экономить тепловую и электрическую энергию, снижать экологические последствия, повышать экономическую эффективность производства. Активная разработка и внедрение систем оптимального управления всевозможными технологическими процессами в мире начались и продолжились в 60-80 годы прошлого века. Однако до сегодняшнего дня не внедрена сколько-нибудь значительная автоматизированная система оптимального управления. Это связано с чрезвычайной сложностью физико-химических явлений, протекающих в современных технологических процессах, что не позволяет создавать достаточно адекватное математическое описание этих явлений.

В последнее время во всем мире наблюдается тенденция использования современных интеллектуальных технологий, которые позволяют использовать знания, опыт и интуицию экспертов. Причем использование методов искусственного интеллекта при синтезе систем оптимального управления позволили значительно упростить процесс их создания, улучшить качество моделей управления и повысить их эффективность. Поэтому актуальной является задача разработки и внедрения интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления различными технологическими процессами, в том числе и в фосфорной подотрасли.

Мы предлагаем использовать методы и средства создания новых интеллектуальных алгоритмов управления новым сложным технологическим процессом - очистки фосфора от мышьяка и органики в промышленных условиях Новоджамбульского фосфорного завода (НДФЗ).

**Ключевые слова:** желтый фосфор, матрица полного факторного эксперимента (ПФЭ), алгоритмы оптимального управления, очистка фосфора, мышьяк, органика, интеллектуальные модели управления, нечеткие алгоритмы, нейронные сети, нейро-нечеткие алгоритмы.

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF INTELLIGENT ALGORITHMS FOR OPTIMAL CONTROL OF THE PHOSPHORUS PURIFICATION PROCESS

**B.A. Suleimenov, G.T.\*Zhailymyssova**

Satbayev university, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: g.zhailymyssova@satbayev.university

In a market economy, the task of implementing optimal control systems for technological processes in non-ferrous and ferrous metallurgy, chemical industry, petrochemistry, etc., becomes crucial. These systems enable more rational use of mineral resources, save thermal and electrical energy, reduce environmental consequences, and enhance the economic efficiency of production. The active development and implementation of optimal control systems for various technological processes worldwide began in the 60s-80s of the last century. However, to this day, no significantly automated optimal control system has been introduced, primarily due to the extraordinary complexity of physico-chemical phenomena in modern technological processes, hindering the creation of sufficiently adequate mathematical descriptions of these phenomena.

Recently, there has been a global trend towards the use of modern intelligent technologies that leverage the knowledge, experience, and intuition of experts. The integration of artificial intelligence methods in synthesizing optimal control systems has simplified their creation, improved the quality of control models, and increased their

---

efficiency. Hence, the relevant task is the development and implementation of intelligent models (algorithms) for controlling various technological processes, including the phosphorus purification subsector.

We propose the use of methods and tools to create new intelligent control algorithms for the complex technological process of purifying phosphorus from arsenic and organics in industrial conditions at the Novodzhambul Phosphorus Plant (NPP3).

**Keywords:** yellow phosphorus, full factorial experiment matrix (FFEM), optimal control algorithms, phosphorus purification, arsenic, organics, intelligent control models, fuzzy algorithms, neural networks, neuro-fuzzy algorithms.

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ АЛГОРИТМДЕРДІ ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ ФОСФОРДЫ ТАЗARTY ПРОЦЕСІН ОҢТАЙЛЫ БАСҚАРУ**

**Б.А. Сулейменов, Г.Т.\* Жайлымысова**

Satbayev university, Алматы, Қазақстан,

e-mail: g.zhailymyssova@satbayev.university

Нарықтық экономикада минералды ресурстарды неғұрлым ұтымды пайдалануға, жылу және электр энергиясын үнемдеуге, экологиялық зардаптарды азайтуға, өндірістің экономикалық тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін түсті және қара металлургияда, химия өнеркәсібінде, мұнай-химияда және т.б. технологиялық процестерді оңтайлы басқару жүйелерін енгізу міндеті тұр. Әлемдегі барлық технологиялық процестерді оңтайлы басқару жүйелерін белсенді дамыту және енгізу өткен ғасырдың 60-80 жылдарында басталды және жалғасты. Алайда, бүгінгі күнге дейін оңтайлы басқарудың айтарлықтай автоматтандырылған жүйесі енгізілмеген. Бұл қазіргі технологиялық процестерде болып жатқан физика-химиялық құбылыстардың өте күрделілігіне байланысты, бұл осы құбылыстардың жеткілікті математикалық сипаттамасын жасауға мүмкіндік бермейді.

Жақында бүкіл әлемде сарапшылардың білімін, тәжірибесін және түйсігін пайдалануға мүмкіндік беретін заманауи интеллектуалды технологияларды қолдану үрдісі байқалды. Сонымен қатар, оңтайлы басқару жүйелерін синтездеу кезінде жасанды интеллект әдістерін қолдану оларды құру процесін едәуір жеңілдетуге, басқару модельдерінің сапасын жақсартуға және олардың тиімділігін арттыруға мүмкіндік берді. Сондықтан әртүрлі технологиялық процестерді, соның ішінде фосфор саласын басқарудың интеллектуалды модельдерін (алгоритмдерін) әзірлеу және енгізу міндеті өзекті болып табылады.

Біз жаңа Күрделі Технологиялық процесі басқарудың жаңа интеллектуалды алгоритмдерін - Новоджамбул фосфор зауытының (ҚДФЗ) өнеркәсіптік жағдайында фосфорды мышьяк пен органикалық заттардан тазартудың әдістері мен құралдарын қолдануды ұсынамыз.

**Түйін сөздер:** сары фосфор, толық факторлық эксперимент матрицасы (ТФЭМ), оңтайлы басқару алгоритмдері, фосфорды тазарту, мышьяк, органикалық заттар, интеллектуалды басқару модельдері, бұлыңғыр алгоритмдер, нейрондық желілер, нейро-бұлыңғыр алгоритмдер.

**Введение.** В настоящее время все более остро встает задача разработки систем оптимального управления технологическими процессами в металлургии, химической промышленности, в нефтехимии и т.д., позволяющие более рационально использовать минеральные ресурсы, экономить тепловую и электрическую энергию, снижать экологические проблемы, повышать экономическую отдачу от производства. Бурный этап в разработке систем оптимального управления различными технологическими процессами в мире, СССР и в Казахстане пришелся на 60-80 годы прошлого века. Однако до сих пор, например, в Казахстане, не внедрена сколько-

нибудь значительная система оптимального управления [1 - 3]. Это связано с чрезвычайной сложностью технологических процессов в цветной и черной металлургии, химической и др. отраслях экономики Казахстана. Попытки создать достаточно адекватные математические модели подобных сложнейших процессов, к сожалению, не увенчались успехом, и мода на разработки моделей постепенно отошла - в последние годы сократились публикации в этом направлении.

Стремительное развитие современных методов и средств разработки и создания интеллектуальных систем привело к значительному росту публикаций

по практическому применению этих методов при создании систем управления.

Мы предлагаем опробовать разрабатываемые методы и средства создания интеллектуальных технологий для управления процессом очистки фосфора от органических примесей и мышьяка. При этом надо учитывать тот факт, что даже незначительное улучшение показателей данного процесса может привести к значительному экономическому и экологическому эффектам.

Проведенные на кафедре автоматизации и управления КазНИТУ многочисленные исследования, а также анализ публикаций показал, что интеллектуальные технологии можно использовать при разработке непосредственно модели оптимального управления процессом, а не модели самого технологического процесса. То есть рассматриваемые интеллектуальные технологии (ИТ) позволяют разрабатывать сразу же алгоритмы управления, в отличие от традиционной цепочки: разработка структуры модели процесса → проведение экспериментальных исследований на объекте → идентификация модели → формулирование оптимизационной задачи → подбор метода оптимизации → разработка алгоритма оптимального управления. Традиционный подход предполагает длительный (порой несколько лет), дорогостоящий и не всегда успешный путь создания системы оптимального управления [1 - 3].

Использование ИТ позволяет решать аналогичные задачи сразу же, и как показал опыт достаточно успешно. Дело в том, что методы искусственного интеллекта предполагают использование знаний, опыта и интуиции людей-экспертов, хорошо знакомых с предметной областью. То есть здесь используется так называемый эффект «готовых знаний». В отличие от этого разработка математической модели (основного компонента системы) является процессом создания «новых знаний», и поэтому требует достаточно длительного времени на проведение теоретических исследований, а также больших материальных и трудовых затрат для проведения экспериментальных исследований и идентификации модели.

К тому же опытные операторы-технологи за время длительной работы научились вести технологический процесс в оптимальных режимах при различных исходных ситуациях (и у них зачастую это получается). Передача «готовых знаний» от экспертов в базу знаний интеллектуальной системы значительно упрощает их создание.

В соответствие с положениями программы развития Казахстана «Индустрия 4.0» будет разработан так называемый «цифровой двойник» оператора-технолога, который исключит влияние «человеческого фактора» при управлении процессом (это такие свойства человеческого организма как: усталость, недостаточно быстрая реакция, недостаточная психологическая устойчивость, сонливость при монотонной работе, незначительный опыт работы молодых операторов и другие причины).

Цель нашего исследования - синтез и испытание в промышленных условиях интеллектуальных моделей (алгоритмов) оптимального управления очисткой желтого фосфора от органических примесей и мышьяка, с получением маломышьяковистого фосфора на Новоджамбульском фосфорном заводе (НДФЗ).

Основные задачи:

- сформулировать концепцию синтеза интеллектуальных алгоритмов оптимального управления процессами очистки желтого фосфора
- сформировать матрицы полного факторного эксперимента (ПФЭ) для синтеза алгоритмов оптимального управления процессом отстоя желтого фосфора;
- синтезировать интеллектуальные модели (алгоритмы) оптимального управления этим процессом с помощью трех методов: нечетких алгоритмов, нейронных сетей и нейро-нечетких алгоритмов;
- провести исследования синтезированных интеллектуальных моделей управления на адекватность, однозначность, устойчивость и чувствительность;
- провести промышленные испытания интеллектуальных алгоритмов.

Объектом исследований является технология очистки фосфорной кислоты от мышьяка и органики, а предметом исследования - интеллектуальные алгоритмы управления этим технологическим процессом.

#### **Материалы и методы.**

*1 Постановка задачи оптимального управления процессом отстоя*

Желтый фосфор-сырец поступает в отделение отстоя фосфора из печного цеха №5 по обогреваемым трубопроводам в десять отстойников (рисунок 1, позиция 1). Соотношение «шлам: P<sub>4</sub>» = 60%-40%.

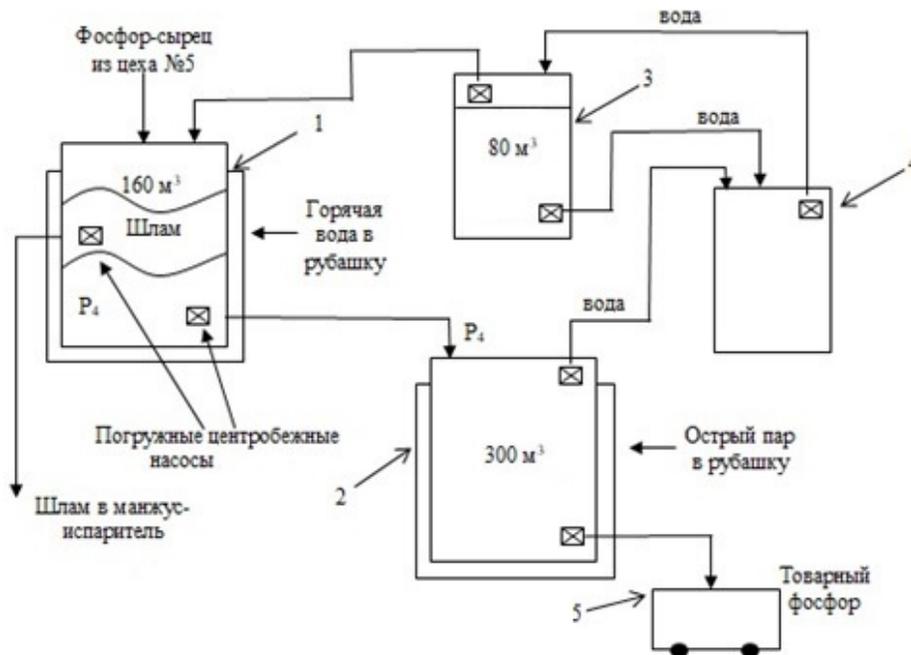


Рис. 1 - Схема цепей аппаратов в отделении отстоя и доработки фосфора,

где: 1 - отстойники в количестве 10 ед; 2 - резервуары для хранения желтого фосфора в количестве 12 ед.; 3 - цистерны кислотной воды в количестве 2 ед; 4 - цистерна фосфорсодержащих стоков; 5 - железнодорожная цистерна для отгрузки товарного фосфора потребителям

Отстойники - это резервуары изготовленные из нержавеющей стали размером: диаметр - 7,4 метра, высота - 4 метра, объём - 160 кубических метра. Для поддержания фосфора в состоянии расплава необходимо поддерживать температуру в пределах 70°С-80°С, для чего в рубашку отстойника подается горячая вода при температуре не более 90°С, а для улучшения отстоя в них установлены мешалки. Длительность отстоя - не менее 2-х часов. В каждом отстойнике имеется два погружных насоса - для перекачки фосфора и фосфорного шлама. Фосфорный шлам удаляется для дальнейшей его переработки с целью извлечения из него остаточного желтого фосфора и очистки фосфора от мышьяка и органических примесей.

С целью избегания самовозгорания фосфора отстойник находится под слоем воды и подается инертный газ - азот. При откачивании фосфора или шлама отстойники заполняются водой из цистерны (позиция 3) для того, чтобы верхний уровень воды оставался постоянным. Желтый фосфор поступает в 12 хранилища (позиция 2) при температуре 70°С-80°С.

Интервью с опытными операторами завода показало, что качество отстоя зависит от следующих пере-

менных: температуры фосфора-сырца, соотношения «шихта:фосфор» и температуры воды, которая подается в рубашку отстойника. Критерием качества управления отстоем является чистота фосфора ( $P_4$ ), поступающего в хранилища: чем меньше шлама поступает в хранилища (позиция 2), тем выше качество готового фосфора.

Управлять качеством готового товарного фосфора можно изменяя длительность процесса отстоя, при этом чем выше длительность процесса отстоя, тем выше будет качество товарного фосфора, при этом количества шлама в товарном фосфоре будет минимально. Однако от длительности отстоя зависит производительность всего отделения: чем выше длительность отстоя, тем ниже производительность отделения. То есть от искусства операторов зависит эффективность процесса очистки - необходимо добиваться заданного качества готового фосфора, и при этом не снижать производительность всего отделения.

Тогда задача оптимального управления процессом очистки фосфора-сырца будет заключаться в том, чтобы: «получать заданное качество товарного фосфора при максимизации производительности

отделения».

Анализ работ [4-19] позволил использовать опыт этих авторов для синтеза интеллектуальных моделей процесса отстоя, при этом управление длительностью отстоя сводится к тому, чтобы своевременно завершать процесс в «хороших» отстойниках, и затягивать отстой в «плохих» отстойниках. Определять «хорошие» и «плохие» отстойники и поможет интеллектуальная модель процесса отстоя жел-

того фосфора, в задачу которой входит прогнозировать длительность отстоя с учетом различных факторов, не зависящих от действий оператора. Имея прогнозные решения модели оператор заранее сможет определять «хорошие» и «плохие» отстойники, тем самым будет иметь возможность управлять всем отделением отстоя (10 отстойниками) оптимальным образом: «Добиваться заданного качества товарного фосфора при максимизации производительности всего отделения отстоя».

Таблица 1 - Матрица ПФЭ для процесса отстоя фосфора-сырца

Номер эксп	Температура фосфора, $X_1$	Соотношение «шлам: $P_4$ » $X_2$	Температура воды, $X_3$	Время отстоя, $Y$
1	2	3	4	5
1	0,0	0,0	0,0	0,98
2	0,5	0,0	0,0	0,91
3	1,0	0,0	0,0	0,82
4	0,0	0,5	0,0	0,21
5	0,5	0,5	0,0	0,124
6	1,0	0,5	0,0	0,07
7	0,0	1,0	0,0	0,065
8	0,5	1,0	0,0	0,06
9	1,0	1,0	0,0	0,058
10	0,0	0,0	0,5	0,99
11	0,5	0,0	0,5	0,92
12	1,0	0,0	0,5	0,82
13	0,0	0,5	0,5	0,21
14	0,5	0,5	0,5	0,128
15	1,0	0,5	0,5	0,072
16	0,05	1,0	0,5	0,066
17	0,5	1,0	0,5	0,062
18	1,0	1,0	0,5	0,06
19	0,0	0,0	1,0	0,97
20	0,5	0,0	1,0	0,88
21	1,0	0,0	1,0	0,78
22	0,0	0,5	1,0	0,18
23	0,5	0,5	1,0	0,12
24	1,0	0,5	1,0	0,065
25	0,0	1,0	1,0	0,062
26	0,5	1,0	1,0	0,058
27	1,0	1,0	1,0	0,056

*2 Формирование матрицы ПФЭ и синтез модели процесса отстаивания желтого фосфора*

Исходные данные для машинного обучения моделей формировались в соответствии с нашей методикой [1, 2, 3 и 8] для чего примем следующие обозначения переменных в процессе отстаивания:  $X_1$  -

температура фосфора (70°-80°С);  $X_2$  - соотношение «шлам:  $P_4$ » (60%-40%);  $X_3$  - температура горячей воды в рубашке отстойника (70°-95°С);  $Y$  - длительность отстоя.

При этом необходимо учитывать, что оператор не имеет возможности изменять входные переменные

модели X1 и X2, которые зависят от работы цеха №5, X3 также не может изменять оператор - температура воды зависит от работы теплоцеха. Оператор может лишь контролировать эти переменные.

Опрос операторов отделения отстоя выявил - как влияют усредненные оценки этих переменных на длительность отстоя (таблица 1). В таблице 1 сформирована матрица полного факторного эксперимента (ПФЭ) для синтеза интеллектуальных моделей. В таблице 1 все переменные представлены в нормированном (безразмерном) виде в диапазоне от 0,0 (минимальное значение) до 1,0 (максимальное значение).

Матрица ПФЭ в таблице 1 служит для обучения интеллектуальных моделей трех типов: нечеткой модели, нейросетевой модели и нейро-нечеткой модели.

**Нечеткая модель.** Разработку нечеткой модели выполняли с использованием графических средств системы Matlab [4] с определением функций принадлежности для трех входных, одной выходной переменной и формированием правил нечеткой про-

дукции, т.е. каждому эксперименту из базы знаний (таблица 1) придается соответствующее правило продукции - ниже в качестве примера приведены 4 правила:

**ПРАВИЛО 1:** «ЕСЛИ X1 РАВНО 0» И «X2 РАВНО 0.5» И «X3 РАВНО 0», ТО «Y РАВЕН 0,98»

**ПРАВИЛО 2:** «ЕСЛИ X1 РАВНО 0.5» И «X2 РАВНО 0.0» И «X3 РАВНО 0», ТО «Y РАВЕН 0,91»

**ПРАВИЛО 3:** «ЕСЛИ X1 РАВНО 1» И «X2 РАВНО 0.0» И «X3 РАВНО 0,0», ТО «Y РАВЕН 0,82»

**ПРАВИЛО 4:** «ЕСЛИ X1 РАВНО 1,0» И «X2 РАВНО 0,0» И «X3 РАВНО 0,0», ТО «Y РАВЕН 0,21»

Аналогично составлялись правила продукции для всех 27 экспериментов из таблицы 1 (рисунок 2). После того, как Matlab произвел все необходимые процедуры с выбранным алгоритмом нечеткого вывода (алгоритмом Мамдани), была синтезирована нечеткая модель процесса осаждения желтого фосфора (рисунок 2).

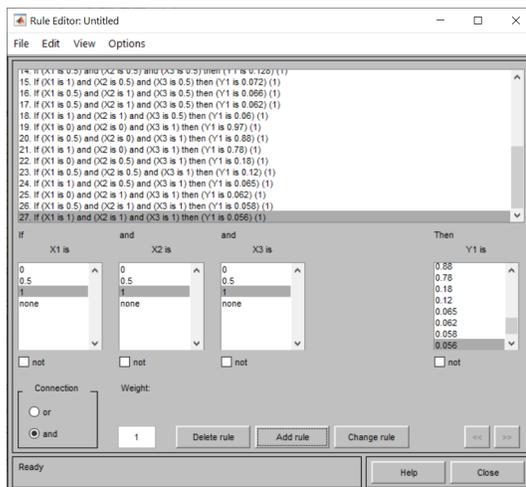


Рис. 2 - Нечеткая модель процесса осаждения желтого фосфора

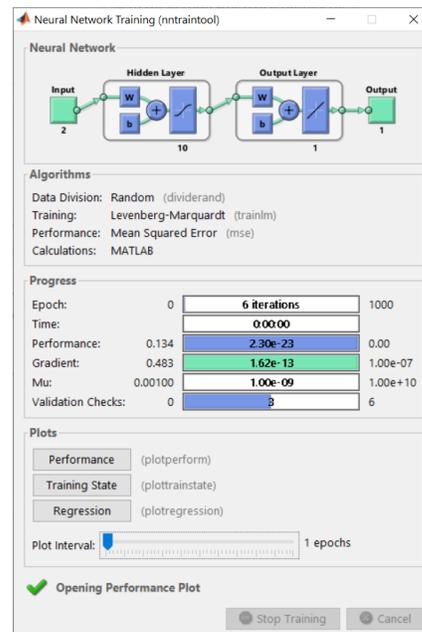


Рис. 3 - Проведение обучения нейросети

**Нейросетевая модель.** Сборку нейронной сети производили с использованием модуля nntool из командного окна среды MatLAB. Далее вводили входные данные и соответствующий им результат, выбра-

ли тип нейронной сети (рисунок 3) и провели ее обучение.

**Нейро-нечеткая модель.** В MATLAB существует редактор ANFIS, который позволяет создавать мо-

дель нейро-нечеткого вывода, выполнять ее обучение, визуализировать ее структуру, изменять и настраивать ее параметры, а так же использовать настроенную сеть для получения результатов нечеткого вывода.

Выбираем метод решетчатого разбиения Grid partition, в котором функции принадлежности равномерно распределяются внутри диапазона. База

знаний основана на таблицы 1, из которой выбраны все возможные варианты. Коэффициенты в заключениях правил принимали равными нулю.

Для проверки модели в блоке тестирования нечеткой системы (Test FIS) выбрали тестовые данные (Testing data), при этом результаты тестирования выводились в окне редактора ANFIS. Матлаб создал 27 правил для работы нейро-нечеткой сети (рисунок 4).

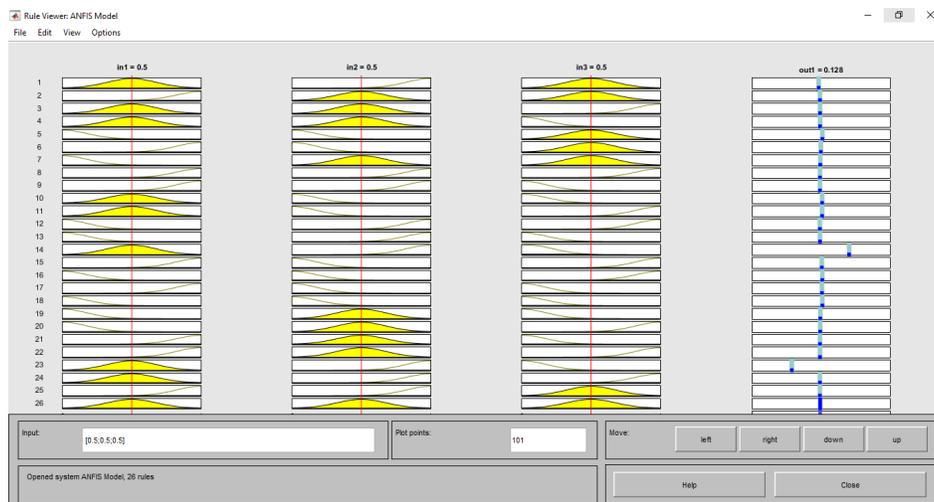


Рис. 4 - Нейро-нечеткая модель

Результаты сравнительных исследований на адекватность всех трех типов моделей приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Сравнительный анализ точности интеллектуальных моделей

№	Правильный ответ	Нечеткая логика	Нейронная сеть	Нейро-нечеткая сеть
1	2	3	4	5
1	0,98	0.125	0.92878	0.9800
2	0,91	0.5	0.64418	0.9100
3	0,82	0.837	0.76134	0.8200
4	0,21	0.67	0.10231	0.2100
5	0,124	0.09	0.16383	0.1240
6	0,07	0.5	0.32048	0.0700
7	0,065	0.13	0.057247	0.0650
8	0,06	0.79	0.060076	0.4897
9	0,058	0.211	0.077015	0.0580
10	0,99	0.211	0.82057	0.9900
11	0,92	0.5	0.059733	0.4783
12	0,82	0.79	0.98687	0.8200
13	0,21	0.79	0.2648	0.2100
14	0,128	0.168	0.10334	0.1280
15	0,072	0.5	0.11462	0.0720

16	0,066	0.5	0.056963	0.0700
17	0,062	0.5	0.056963	0.0700
18	0,06	0.5	0.072156	0.0600
19	0,97	0.13	0.98728	0.9700
20	0,88	0.13	0.98837	0.8800
21	0,78	0.5	0.98956	0.7800
22	0,18	0.79	0.5749	0.1800
23	0,12	0.79	0.862	0.1200
24	0,065	0.5	0.774	0.0650
25	0,062	0.79	0.11218	0.0620
26	0,058	0.5	0.059589	0.0579
27	0,056	0.79	0.059069	0.0560
Ошибка		18,05%	16,22%	3,27%

Анализ таблицы 2 показал, что наиболее адекватной является нейро-нечеткая модель, абсолютная ошибка которой равна 3,2%. В связи с чем ниже мы будем исследовать результаты моделирования процесса отстоя желтого фосфора лишь с помощью этой модели.

### 3 Моделирование процесса отстаивания с использованием нейро-нечеткой сети

На рисунке 5 представлены результаты моделирования с помощью нейро-нечеткой модели зависимости производительности отстойника (длительность отстоя -  $Y$ ) от температуры сырья  $X_1$  (желтого фосфора из цеха №5). Из рисунка видно, что при минимальных значениях  $X_2$  (соотношение «шлам :  $P_4$ ») и  $X_3$  (температура воды) - производительность достаточно низкая на всём диапазоне изменения температуры желтого фосфора -  $X_1$ , при этом время отстоя снижается от 1,0 до 0,8. Однако при средних и высоких значениях  $X_2$  и  $X_3$  длительность отстоя резко снижается (т.е. производительность отстойника увеличивается), но оно также незначительно изменяется при повышении температуры желтого фосфора на входе отстойника ( $X_1$ ).

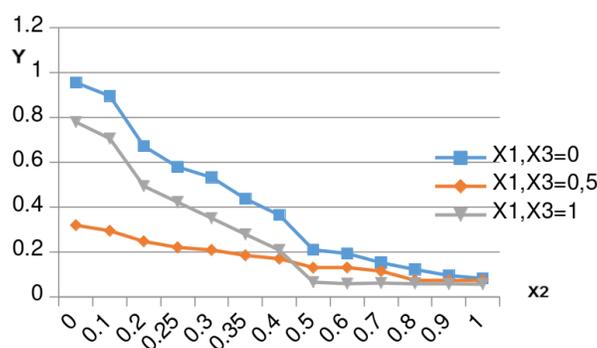


Рис. 5 - Зависимость длительности отстоя от температуры желтого фосфора

Как можно заметить по характеру изменения кривых на этих рисунках - зависимость длительность отстоя от изменения  $X_2$ , гораздо выше, чем, чем от  $X_3$ . При этом из графиков рисунка 2.5 хорошо видно, что производительность отстойника резко повышается при средних и больших значениях  $X_2$  и  $X_3$ . Однако графики на рисунке 6 говорят о том, что время отстоя в основном зависит от соотношения «шлам :  $P_4$ », а кривые на рисунке 7 показывают, что производительность практически не зависит от температуры

воды в рубашке отстойника.

Таким образом результаты моделирования показали, что производительность отстойника в большей степени зависит от соотношения «шлам :  $P_4$ », в меньшей степени от температуры фосфора и практически не зависит от изменения температуры воды (см. рисунок 7).

Однако это не означает, что температуру воды в рубашке отстойника совершенно не нужно учитывать при управлении процессом отстоя, так как от

нее зависит агрегатное состояние желтого фосфора: при температуре ниже 70°C фосфор переходит в твердое состояние и процесс отстоя прекращается, так как он оседает на дно вместе со шламом, а при превышении 95°C - желтый фосфор начинает испаряться - это прямые его потери. Кроме того, контроль температуры является важнейшим фактором безопасного ведения процесса отстоя, так как фосфор взрывоопасен.

Результаты моделирования с использованием нейро-нечетой модели, представленные на рисун-

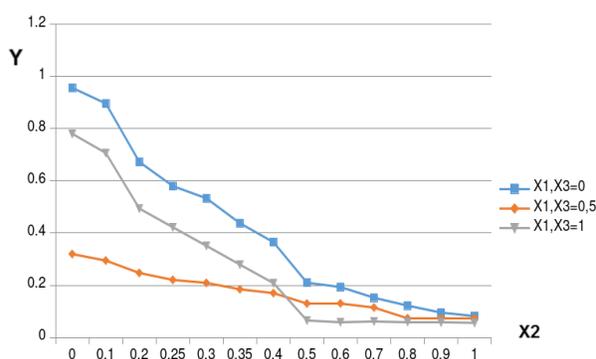


Рис. 6 - Результаты моделирования зависимости времени отстоя от изменения соотношения «шлам : 4»

Этот факт кардинально отличает процесс очистки фосфора от известных процессов осаждения шламов. Достаточно хорошо отработанная теория осаждения шламов не работает для описания процесса отстоя желтого фосфора. По этой теории - чем выше концентрация шлама, тем ниже производительность сгустителя (или выше длительность отстоя шлама). Этот эффект объясняется стесненным осаждением частиц шлама - чем их концентрация выше, тем выше стесненность частиц шлама, так как частицы начинают больше влиять друг на друга, замедляя скорость их осаждения. В случае осаждения фосфора - все происходит наоборот: чем выше концентрация шлама, тем меньше длительность отстоя (или выше производительность отстойника), что хорошо заметно из рисунка 5 и подтверждается графиками на рисунках 6 и 7. Этот эффект объясняется тем, что в нашем случае осаждается фосфор, а не шлам, который скапливается вверху отстойника. Получается, что чем меньше концентрация частиц фосфора, тем быстрее идет их процесс осаждения на дно отстойника. А если концентрация желтого фосфора выше, то эффект стесненности его частиц снижает скорость

их осаждения. как 5, 6 и 7 хорошо коррелируют с физическими закономерностями процесса отстоя желтого фосфора. Необходимо отметить, что процесс отстоя желтого фосфора значительно отличается от процессов осаждения шламов в жидкой среде, применяемых в цветной металлургии и химической промышленности. Дело в том, что в отличие от известных процессов осаждения шламов (вредной компоненты) - в нашем случае осаждаются не шламы, а сам желтый фосфор. При этом шламы всплывают на поверхность отстойника.

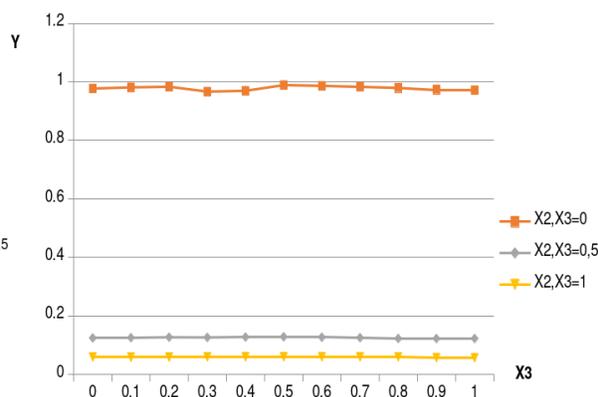


Рис. 7 - Зависимости времени отстоя от температуры воды в рубашке отстойника

их осаждения. Таким образом, графики, приведенные на рисунках 5, 6 и 7, достаточно хорошо согласуются с физическими закономерностями процесса отстоя желтого фосфора, и являются его математическими моделями.

#### 4 Интеллектуальный алгоритм оптимального управления процессом отстоя желтого фосфора

Как уже отмечалось выше - обеспечивать высокое качество готового фосфора можно изменяя длительность отстоя. Чем выше длительность процесса отстоя, тем чище будет товарный фосфор, то есть концентрация шлама в готовом фосфоре будет минимально. В тоже время, длительность процесса отстоя влияет на производительность оборудования - чем дольше производится отстой, тем ниже производительность отделения. операторы стараются добиваться заданного качества товарного фосфора, но при этом не снижать производительность оборудования цеха.

Таким образом, задача оптимального управления этим процессом заключается в следующем: «Доби-

---

ваться заданного ГОСТами качества готового фосфора при максимизации производительности отделения отстоя».

Синтезированная нейро-нечеткая модель процесса отстоя, и результаты проведенных её исследований (рисунки 5, 6 и 7) позволяет в реальном режиме времени прогнозировать длительность осаждения желтого фосфора (Y) в зависимости от изменения  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  в каждом из 10 отстойников. С учетом изложенного стратегия оптимального управления процессом отстоя желтого фосфора будет заключаться в следующем.

Оператор, имея информацию о прогнозе длительности отстоя желтого фосфора в каждом из 10 отстойников, имеет возможность управлять включением погружных насосов по откачке желтого фосфора и шлама таким образом, чтобы из отстойника с минимальной длительностью отстоя выгружались фосфор и шлам в большем объеме, чем из отстойника, где длительность отстоя максимальна.

Таким образом интеллектуальная модель позволяет оператору иметь информацию о том, какой в каждый момент времени из 10 отстойников является «плохим» (время отстоя максимально), а какой отстойник является «хорошим» (время отстоя минимально). Манипулируя этой информацией, оператор будет больше откачивать фосфор и шлам из «хороших» отстойников, и меньше - из «плохих».

Здесь важно отметить то, что система интеллектуального управления позволяет передавать оператору информацию о «хороших» и «плохих» отстойниках заранее - тем самым упреждая нерациональные включения и отключения погружных насосов для откачки фосфора и шлама.

Кроме того, визуально процесс отстоя оператор не может наблюдать, так как отстойник является закрытым объектом, то есть наблюдаемость объекта - нулевая. В этих условиях оператор может заметить попадание шлама в резервуар хранения желтого фосфора (позиция 2 на рисунке 1) слишком поздно и допустить брак в работе отделения.

**Обсуждение и результаты.** Таким образом, синтезированные интеллектуальные алгоритмы управления позволяют оператору ускорять освобождение «хороших» отстойников (позиция 1 на рисунке 1) и замедлять освобождение «плохих» отстойников. Кроме того, оператор будет гораздо реже делать обходы отстойников с целью контроля «чистоты» желтого фосфора в отбираемых пробах, что облегчит его труд и даст возможность большую часть

своего времени отводить процессу управления скоростью откачки фосфора и шлама из отстойников.

То есть, в этом случае будет решена основная цель оптимального управления процессом отстоя: «Добиваться заданного качества товарного фосфора при максимизации производительности всего отделения отстоя».

Испытания программного обеспечения системы управления процессом отстоя и очистки желтого фосфора проводилось по типовым методикам. В связи с тем, что типовыми методиками предусматривается проведение испытаний в течении лишь 72 часов (что совершенно недостаточно для набора необходимой статистики) руководством завода для оценки ожидаемого экономического эффекта было принято решение о проведении длительных испытаний интеллектуальных алгоритмов оптимального управления. Причем предусматривалась работа оборудования в двух режимах: на первом этапе производились контрольные измерения показателей работы оборудования без учета расчетов алгоритма, а на втором этапе оборудование работало с учетом рекомендаций интеллектуального алгоритма.

Для обеспечения безопасности испытания интеллектуальных алгоритмов осуществлялось в разомкнутом режиме (в режиме советчика).

Промышленные испытания проводились: Первый этап испытаний проводился в течении 21 дня, при этом осуществлялся лишь контроль показателей работы отстойника без участия управляющего компьютера в работу оборудования, а на втором этапе промышленных испытаний интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления в течении 14 дней операторы цеха выполняли указания компьютера (как советчика) в режиме реального времени.

Сравнительный анализ показал положительные оценки предложенных алгоритмов управления: удельный выход готовой продукции увеличился на 5%, а качество товарного желтого фосфора улучшилось на 3% .

**Выводы.** Целью настоящего исследования является разработка и промышленные испытания интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления технологическим процессом очистки фосфора от органики и мышьяка в оптимальных режимах, с получением высококачественного маломышьяковистого фосфора. Проведенные исследования алгоритмов и их промышленные испытания показали, что поставленная цель была достигнута.

В результате проведенной работы были получены

следующие результаты:

- синтезированы и исследованы интеллектуальные модели, описывающие поведение шлама и фосфора в отстойниках с использованием трех технологий: нечетких и нейронечетких алгоритмов и нейронных сетей с использованием полученных в ходе «мысленных» экспериментов ПФЭ для трех входных и одной выходной переменных:  $X_1$  - температура фосфора ( $70^{\circ}$ - $80^{\circ}$ C);  $X_2$  - соотношение «шлам:  $P_4$ » (60%-40%);  $X_3$  - температура горячей воды в рубашку отстойника ( $70^{\circ}$ C- $95^{\circ}$ C);  $Y$  - длительность отстоя.

- проведены исследования всех трех интеллектуальных моделей управления на их адекватность, как оказалось нейро-нечеткие модели показали высокую точность и описывают физико-химические закономерности процесса отстоя.

- промышленные испытания интеллектуальных алгоритмов показали положительные результаты: удельный выход готовой продукции увеличился на 5%, а качество товарного желтого фосфора улучшилось на 3%.

Проведенные исследования и промышленные испытания интеллектуальных алгоритмов управления показали, что предложенные методы можно использовать для синтеза аналогичных алгоритмов управления любыми технологическими процессами.

**Источник финансирования:** Грантовое финансирование Министерством науки и высшего образования по проекту ИРН АР19674691 «Разработка, исследование и промышленные испытания математических моделей и интеллектуальных алгоритмов управления процессами производства фосфорной кислоты высшего качества».

### Литература

1. Авторское свидетельство № 985. Метод синтеза оптимальных систем управления технологическими процессами / Сулейменов Б.А., Сугурова Л.А., Сулейменов А.Б. опубл. от 28 мая 2015 г.
2. Авторское свидетельство № 986. Методика создания автоматизированной системы оперативной диагностики состояния технологического оборудования (производство науки) / Сулейменов Б.А., Сугурова Л.А., Сулейменов А.Б. опубл. от 28 мая 2015 года.
3. Авторское свидетельство № 0665. Метод синтеза системы оперативной диагностики состояния турбоагрегатов тепловых электростанций (производство науки) / Сулейменов Б.А., Сулейменов А.Б. опубл. от 12 апреля 2016 года.
4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzTECH / А.В. Леоненков. - СПб.: БХВ-Петербург, 2003. - 736 с.
5. Data Democracy: At the Nexus of Artificial Intelligence, Software Development and Knowledge Engineering Edited by Feras A. Batarseh. // Academic Press. - 2020, -Vol.2, No 1. - pp..266.
6. Abdel-Ghafar H.M., Abdel-Aal E.A., Ibrahim M.A.M., El-Shall H., Ismail A.K. Purification of high iron wet-process phosphoric acid via oxalate precipitation method // Hydrometallurgy. - 2019.- Vol. 184. - pp. 1-8.
7. Aguel S., Meddeb Z., Jeday M.R. Parametric study and modeling of cross-flow heat exchanger fouling in phosphoric acid concentration plant using artificial neural network // Journal of Process Control. - 2019.- Vol. 84. - pp.133-145.
8. Suleimenov B. A., Sugurova L. A., Suleimenov A. B. Intelligent systems of optimal control and operational diagnostics (methods of synthesis and application) // Shikula: Almaty 2016. - P.207.
9. Offermans T., Szymańska E., Buydens L.M.C., Jansen J.J. Synchronizing process variables in time for industrial process monitoring and control // Computers & Chemical Engineering. -2020. Vol. 140. - pp.25-28.
10. Rafiei M., Ricardez-Sandoval L.A. Integration of design and control for industrial-scale applications under uncertainty: a trust region approach. Computers & Chemical Engineering. - 2020. Vol. 141. - pp.25-27.
11. Khamparia A., Pandey B., Pandey D. K., Gupta D., Khanna A., Hugo V. Comparison of RSM, ANN and fuzzy logic for extraction of oleonolic acid from ocimum sanctum // Computers in Industry. - 2020.- Vol. 117. - pp.24-26.
12. Silhavy F., Radek T. Artificial Intelligence and Algorithms in Intelligent Systems. Editors: Proceedings of 7<sup>th</sup> Computer Science On-line Conference 2018. Vol. 2, - P.118-121.
13. Silhavy F., Radek T. Cybernetics and Automation Control Theory Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings

- 
- of 8th Computer Science On-line Conference 2019. Vol. 3. - pp.19-21.
14. Yang Li, Jianhua Zhang, Wu Qiong. Adaptive Sliding Mode Neural Network Control for Nonlinear Systems. Emerging Methodologies and Applications in Modelling // Academic Press - 2018. Vol.1. - pp.186
15. Mark K., Robert O. Software Engineering for Embedded Systems. // Newnes. - 2019.- 645 p.  
ISBN-13978-0128094488
16. Chang D, Liu J, Mao N, Ge S. Measurement and analysis of virgin-rock temperature in Huanren metal mine. In: Proceedings of the Third International Symposium on Mine Safety Science and Engineering.- 2016 Aug 13-19.- Montreal, QC, Canada. - 2016. - 204-207 pp.
17. Trabelsi W., Tlili A. Phosphoric acid purification through different raw and activated clay materials (Southern Tunisia). Journal of African Earth Sciences. - 2017. Vol. 129, - P.647-658.
18. Paulino N.M.G., Foo M., Kim J., Bates D.G. On the stability of nucleic acid feedback control systems. Automatica. - 2020. Vol. 119. - 67-68 pp.
19. He G., Dang Y., Zhou L., Dai Y., Que Y., Ji X. Architecture model proposal of innovative intelligent manufacturing in the chemical industry based on multi-scale integration and key technologies. Computers & Chemical Engineering. - 2020. Vol. 141. - 45-48 pp.

### References

1. Avtorskoe svidetel'stvo № 985. Metod sinteza optimal'nyh sistem upravlenija tehnologicheskimi processami / Sulejmenov B.A., Sugurova L.A., Sulejmenov A.B. opubl. ot 28 maja 2015 g.
2. Avtorskoe svidetel'stvo № 986. Metodika sozdanija avtomatizirovannoj sistemy operativnoj diagnostiki sostojanija tehnologicheskogo oborudovanija (proizvedenie nauki) / Sulejmenov B.A, Sugurova L.A., Sulejmenov A.B. opubl. ot 28 maja 2015 goda.
3. Avtorskoe svidetel'stvo № 0665. Metod sinteza sistemy operativnoj diagnostiki sostojanija turboagregatov teplovyh jelektrostantsij (proizvedenie nauki) / Sulejmenov B.A., Sulejmenov A.B. opubl. ot 12 aprilja 2016 goda.
4. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzTECH / A.V. Leonenkov. - SPb.: BHV-Peterburg, 2003. - 736 s.
5. Data Democracy: At the Nexus of Artificial Intelligence, Software Development and Knowledge Engineering Edited by Feras A. Batarseh. // Academic Press. - 2020, -Vol.2, No 1. - pp.,266.
6. Abdel-Ghafar H.M., Abdel-Aal E.A., Ibrahim M.A.M., El-Shall H., Ismail A.K. Purification of high iron wet-process phosphoric acid via oxalate precipitation method // Hydrometallurgy. - 2019.- Vol. 184. - pp. 1-8.
7. Aguel S., Meddeb Z., Jeday M.R. Parametric study and modeling of cross-flow heat exchanger fouling in phosphoric acid concentration plant using artificial neural network // Journal of Process Control. - 2019.- Vol. 84. - pp.133-145.
8. Suleimenov B. A, Sugurova L. A., Suleimenov A. B. Intelligent systems of optimal control and operational diagnostics (methods of synthesis and application) // Shikula: Almaty 2016. - P.207.
9. Offermans T., Szymańska E., Buydens L.M.C., Jansen J.J. Synchronizing process variables in time for industrial process monitoring and control // Computers & Chemical Engineering. -2020. Vol. 140. - pp.25-28.
10. Rafiei M., Ricardez-Sandoval L.A. Integration of design and control for industrial-scale applications under uncertainty: a trust region approach. Computers & Chemical Engineering. - 2020. Vol. 141. - pp.25-27.
11. Khamparia A., Pandey B., Pandey D. K., Gupta D., Khanna A., Hugo V. Comparison of RSM, ANN and fuzzy logic for extraction of oleonolic acid from ocimum sanctum // Computers in Industry. - 2020.- Vol. 117. - pp.24-26.
12. Silhavy F., Radek T. Artificial Intelligence and Algorithms in Intelligent Systems. Editors: Proceedings of 7<sup>th</sup> Computer Science On-line Conference 2018. Vol. 2, - P.118-121.
13. Silhavy F., Radek T. Cybernetics and Automation Control Theory Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of 8th Computer Science On-line Conference 2019. Vol. 3. - pp.19-21.

14. Yang Li, Jianhua Zhang, Wu Qiong. Adaptive Sliding Mode Neural Network Control for Nonlinear Systems. Emerging Methodologies and Applications in Modelling // Academic Press - 2018. Vol.1. - pp.186
15. Mark K., Robert O. Software Engineering for Embedded Systems. // Newnes. - 2019.- 645 p. ISBN-13978-0128094488
16. Chang D, Liu J, Mao N, Ge S. Measurement and analysis of virgin-rock temperature in Huanren metal mine. In: Proceedings of the Third International Symposium on Mine Safety Science and Engineering.- 2016 Aug 13-19.- Montreal, QC, Canada. - 2016. - 204-207 pp.
17. Trabelsi W., Tlili A. Phosphoric acid purification through different raw and activated clay materials (Southern Tunisia). Journal of African Earth Sciences. - 2017. Vol. 129, - P.647-658.
18. Paulino N.M.G., Foo M., Kim J., Bates D.G. On the stability of nucleic acid feedback control systems. Automatica. - 2020. Vol. 119. - 67-68 pp.
19. He G., Dang Y., Zhou L., Dai Y., Que Y., Ji X. Architecture model proposal of innovative intelligent manufacturing in the chemical industry based on multi-scale integration and key technologies. Computers & Chemical Engineering. - 2020. Vol. 141. - 45-48 pp.

***Сведения об авторах***

Сулейменов Б. А. - доктор технических наук, профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, e-mail: b.suleimenov@satbayev.university;

Жайлымысова Г. Т. - докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, e-mail: g.zhailymyssova@satbayev.university

***Information about the authors***

Suleimenov B. A. - Doctor of Technical Sciences, Professor of the K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, e-mail: b.suleimenov@satbayev.university

Zhailymyssova G. T. - Doctoral student, K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, e-mail: g.zhailymyssova@satbayev.university