МРНТИ 61.53.15 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.3.28-1207**

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕЙ И ИХ ПРОДУКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПИРОЛИЗА

[1,2]Н.У. Нургалиев✉, [1,2]Е.К. Айбульдинов✉, [1]Ж.Б. Искакова✉, [3]А. Колпек, [3]А.С. Сабитов, [1,3]Л.А. Кусепова

[1]Научно-исследовательский институт Новых химических технологий, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
[2]Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан,
[3]Кафедра химии, факультет естественных наук, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
✉Корреспондент-автор: nurgaliev_nao@mail.ru, elaman_@mail.ru, zhanariskakova@mail.ru

Использование угля, являющегося одним из наиболее потребляемых видов ископаемого топлива в мире, обладающее обширными и долгосрочными разведанными запасами, часто приводит к таким проблемам, как низкая энергоэффективность и загрязнение окружающей среды [1]. В данном случае, пиролиз является важным методом достижения эффективного и экологически чистого использования угля, а также представляется универсальной альтернативой, позволяющей термически разлагать широкий спектр марок угля. В связи с этим, в этой статье проведен пиролиз углей трех месторождений Казахстана (Богатырь, Борлы, Майкубен) в реторте Фишера при 520 °С. Определены физико-химические свойства углей и выходы пиролизных продуктов, таких как смола, полукокс и горючий газ. Наибольшие выходы смолы и газа наблюдаются от углей месторождений Борлы и Майкубен соответственно. Компонентный состав газа, полученный в результате пиролиза углей, проводили хроматографическим методом анализа, а вещественный состав смол полукоксования после их деасфальтизации пентаном определяли методом газовой хроматомасс-спектрометрии. Минеральный состав и микроструктурный анализ золы углей проводили соответственно методами рентгенофлуоресцентного анализа и сканирующей электронной микроскопии.

Ключевые слова: уголь, пиролиз, смола, горючий газ, полукокс, зола угля

ПИРОЛИЗ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН КӨМІРЛЕР МЕН ОЛАРДЫҢ ӨНІМДЕРІНІҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

[1,2]Н.У. Нургалиев✉, [1,2]Е.К. Айбульдинов✉, [1]Ж.Б. Искакова✉, [3]А. Колпек, [3]А.С. Сабитов, [1,3]Л.А. Кусепова

[1]Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
[2]Қ.Құлажанов атындағы технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан,
[3]Химия кафедрасы, жаратылыстану ғылымдар факультеті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
e-mail: nurgaliev_nao@mail.ru, elaman_@mail.ru, zhanariskakova@mail.ru

Кең ауқымды және ұзақ мерзімді барланған қорлары бар әлемдегі ең көп тұтынылатын қазба отындарының бірі болып табылатын көмірді пайдалану көбінесе энергия тиімділігінің төмендігі және қоршаған ортаның ластануы сияқты мәселелерге әкеледі [1]. Осындай жағдайда пиролиз әдісі көмірді тиімді және экологиялық таза пайдалануға қол жеткізудің маңызды әдісі болып табылады, сонымен қатар көмір маркаларының кең ауқымын термиялық ыдыратуға мүмкіндік беретін әмбебап балама ретінде ұсынылған. Осыған байланысты, осы мақалада 520 °С температурада Фишер ретортында Қазақстанның үш кен орнының (Богатырь, Борлые, Майкубен) көмірін пиролиздеу жүргізілді. Көмірдің физика-химиялық қасиеттері және шайыр, жартылай кокс және жанғыш газ сияқты пиролиз өнімдерінің шығымы анықталды. Шайыр мен газдың ең үлкен шығымы сәйкесінше Борлық және Майкубен кен орындарының көмірінен байқалады. Көмірдің пиролизінен алынған газдың компоненттік құрамы хроматографиялық талдау әдісімен жүргізілді, ал пентанмен

деасфальтталғаннан кейін жартылай коксталған шайырлардың заттық құрамы газ хроматомасса-спектрометрия әдісімен анықталды. Көмір күлінің минералды құрамы мен микроқұрылымдық талдауы сәйкесінше рентгенофлуоресцентті талдау және сканерлеуші электронды микроскопия әдістерімен жүргізілді.

Түйін сөздер: көмір; пиролиз; шайыр; жанғыш газ; жартылай кокс; көмір күлі

PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF COALS AND THEIR PRODUCTS OBTAINED BY PYROLYSIS

[1,2]N.U. Nurgaliyev✉, [1,2]Ye.K. Aibuldinov✉, [1]Zh.B. Iskakova✉, [3]A. Kolpek, [3]A.S. Sabitov, [1,3]L.A. Kusepova

[1]Research Institute of New Chemical Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
[2]Kazakh University of Technology and Business named after K. Kulazhanov, Astana, Kazakhstan,
[3]Department of Chemistry, Faculty of Natural Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
e-mail: nurgaliev_nao@mail.ru, elaman_@mail.ru, zhanariskakova@mail.ru

The use of coal, which is one of the most consumed fossil fuels in the world, with extensive and long-term proven reserves, often leads to such problems as low energy efficiency and environmental pollution [1]. In this case, pyrolysis is an important method to achieve efficient and environmentally friendly use of coal, and also appears to be a universal alternative that allows thermal decomposition of a wide range of coal grades. In this regard, in this article, pyrolysis of coals from three deposits in Kazakhstan (Bogatyr, Borly, Maikuben) was carried out in a Fischer retort at 520 °C. The physicochemical properties of coals and the yields of pyrolysis products such as tar, semi-coke and combustible gas were determined. The highest yields of tar and gas were observed from coals from the Borly and Maikuben deposits, respectively. The component composition of the gas obtained as a result of coal pyrolysis was analyzed using a chromatographic method, and the material composition of the semi-coking resins after their deasphalting with pentane was determined using gas chromatograph mass spectrometry. The mineral composition and microstructural analysis of coal ash were carried out using X-ray fluorescence analysis and scanning electron microscopy, respectively.

Keywords: coal, pyrolysis, resin, combustible gas, semi-coke, coal ash

Введение. Для рационального использования угля необходимо понимать его внутреннюю структуру. Органическая часть угля обычно рассматривается как сложный полимер с высокой степенью сшивки, включающий в себя как ароматические, так и алифатические фрагменты [2,3]. При этом угли на разных стадиях метаморфизма обладают заметными различиями в строении, что, в свою очередь, отражается на их промышленном применении [4]. Поэтому детальное понимание структуры углей различных степеней метаморфизма крайне важно для эффективной переработки и использования этих ресурсов.

Продвижение чистых технологий переработки угля имеет решающее значение для повышения энергоэффективности и снижения выбросов углерода [5]. Традиционные термохимические процессы, такие как коксование (при температуре 1000-1100°C) и газификация (1000-1600°C), позволяют перерабатывать уголь в металлургический кокс и синтез-газ соответственно. Однако такие процессы сталкиваются с присущими им ограничениями: коксование требует специальных спекающихся углей и приводит к образованию значительного количества полициклических ароматических углеводородов, в то время как газификация влечет за собой существенные энергетические потери из-за экстремальных условий эксплуатации и сложных требований к очистке газа [6]. В связи с этим, среди существующих технологий термической переработки угля пиролиз считается сегодня одним из наиболее перспективных и активно изучаемых методов и особенно эффективен для обработки низкокачественного угля, нефтешламов и других подобных отходов. Пиролиз является ключевым этапом множества процессов, таких как газифика-

ция, сжигание, сжижение и карбонизация. Эти процессы, как правило, осуществляются в системах с инертной, восстановительной или окислительной атмосферой при различных условиях давления и времени реакции. Одним из главных продуктов пиролиза угля является каменноугольная смола, представляющая значительную ценность как сырье. Смола может использоваться для получения таких веществ, как олефины [7,8], ароматические соединения [9], а также материалы на ее основе [7].

Например, смоляные фракции могут перерабатываться в такие химические продукты, как бензол, толуол и фенольные смолы. Кроме смолы в результате пиролиза образуются также такие ценные продукты как горючий газ и твердый остаток (кокс, полукокс в зависимости от температуры пиролиза). Пиролизный газ используется в качестве топлива для промышленного отопления или производства водорода [10], а твердый остаток может служить чистым твердым топливом для производства электроэнергии или как сырьеё для газификации. Таким образом, одновременно решая вопросы эффективности использования ресурсов, гибкости производства и контроля выбросов, пиролиз зарекомендовал себя как перспективный путь использования ископаемого топлива.

Целью данной работы является исследование процесса пиролиза (полукоксования) углей месторождений Богатырь, Борлы, Майкубен (Казахстан) с определением физико-химических свойств углей и продуктов их термического разложения.

Материалы и методы. Для проведения анализа исходного угля готовили аналитическую пробу. Для оценки химического состава золы угля была приготовлена проба в количестве 10 грамм.

Таблица 1 - Режим нагрева навески угля

Время от начала нагревания мин.	Температура, °С
10	220
20	310
30	380
40	440
50	480
60	505
70	520
80	520

Для проведения процесса низкотемпературного пиролиза угля предварительно была отобрана аналитическая проба угля весом 0,6 кг и подготовлена усредненная проба для проведения процесса пиролиза в реторте Фишера. Уголь высушивали на воздухе до достижения приблизительного равновесия между влажностью пробы и окружающей атмосферы. Проба угля была осторожно измельчена так, чтобы не менее 90% ее проходило через сито с отверстием размером 1 мм и не более чем 50% через сито 0,2 мм. Подготовленную пробу хранили в герметически закупоренной емкости. Навеску угля (50 г) нагревали в алюминиевой реторте до 520°С в течение 80 минут в соответствии с режимом нагрева, приведенном в таблице 1. Продукты разложения направляли в приемник, охлаждаемый водой со льдом. Смола и вода конденсировались. Газообразные продукты после отбора проб для анализа выбрасывались в атмосферу. Выходы продуктов

полукоксования образцов углей определяли в соответствии с ГОСТ 3168-93. Определение компонентного состава газа, полученного в результате пиролиза угля, проводили на хроматографе ЛХМ-8 МД.

Вещественный состав смол полукоксования после их деасфальтизации пентаном определялся методом газовой хроматомасс-спектрометрии на приборе Agilent Technolog. Условия хроматографирования: капиллярная колонка DB-Petro (полидиметилсилоксан) длиной 100 м, подъем температуры от 50 до 290ºС со скоростью 10ºС/-мин, далее – изотерма. Минеральный состав золы углей проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа на энергодисперсионном рентгеновском спектрометре Epsilon 4 (Malvern Panalytical), напряжение рентгеновской трубки 50 кВ, ток до 0,5 мА, атмосфера - вакуум. Микроструктурный анализ золы, образовавшейся после пиролиза углей, проводили методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) с помощью микроскопа JSM-6390LV с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80. Рабочие параметры прибора составляли: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток – 0,5 нА, режим высокого вакуума.

Обсуждение и результаты. Результаты определения физико-химических характеристик исследуемых образцов углей различных месторождений (далее – уголь Богатырь, уголь Борлы, уголь Майкубен) приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Физико-химические показатели образцов углей различных месторождений

Показатель	уголь Богатырь	уголь Борлы	уголь Майкубен
W^{daf}, %	4,32	5,34	9,64
V^{daf}, %	31,74	22,31	48,59
A^{daf}, %	45,04	47,38	22,49
C^{d}, %	81,86	84,41	75,21
H^{d} , %	7,24	5,96	6,02
O^{d}, %	9,28	6,94	17,25
N^{d}, %	1,27	1,19	1,07
S^{d}, %	0,35	1,50	0,45

Как видно из таблицы 2, угли Богатырь и Борлы характеризуются высоким содержанием зольности, составляющей свыше 40%, и небольшим количеством летучих веществ. Вместе с тем, у угля Майкубен наблюдается наименьшее содержание углерода, а также наибольшее содержание летучих веществ, влажности и кислорода, ввиду того, что данный уголь является бурым окисленным углем, что непосредственно определяет его соответствующие физико-химические свойства.

Выход и состав продуктов полукоксования образцов углей в стандартной реторте приведены в таблицах 3 и 4.

Результаты анализа выхода продуктов (получаемых из образцов угля) показали, что наибольшие выходы смолы (более 7%) и газа (более 11%) наблюдается соответственно у углей Борлы и Майкубен. Низкая зольность и высокое количество летучих веществ угля Майкубен, по-видимому, способствует наименьшему содержанию полученного полукокса (~70%). Вместе с тем, из-за высокой зольности и небольшого количества летучих веществ в результате пиролиза углей Богатырь и Борлы получается большой выход полукокса (превышающем 80%), при этом у Борлы наблюдаются более высокие выходы как смолы, так и газа.

Таблица 3 - Выход продуктов полукоксования образцов углей различных месторождений

Продукт	уголь Богатырь		уголь Борлы		уголь Майкубен	
	a	d	a	d	a	d
Полукокс	89,44	90,64	81,99	83,01	66,54	73,64
Смола	3,66	3,71	7,73	7,85	4,04	4,47
Вода пирогенетическая	2,28	2,31	1,70	1,73	8,31	9,20
Газ	3,30	3,34	6,88	7,41	11,47	12,69
Wa	1,32	-	1,70	-	9,64	-
Итого	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Примечание: a – на аналитическую пробу, d – на сухое состояние.

Как видно из таблицы 4, несмотря на более низкие показатели выходов жидких и газообразных продуктов, смола угля Богатырь характеризуется относительно высоким содержанием водорода (≈9%), что может указывать на высокую реакционную способность и высокую степень ароматичности (присутствие насыщенных и ароматических соединений). Полукокс от угля Борлы имеет низкое содержание углерода, водорода и высокую зольность, что указывает на его низкое качество и возможность неэффективного использования в качестве энергетического топлива, а также сырья в химическом синтезе и др. Однако в полукоксе, полученном от угля Майкубен, наблюдается низкое содержание зольности (≈12%) и достаточное количества углерода (≈81%), из-за чего такой материал можно использовать в ряде отраслей промышленности, например, в качестве твердого топлива в теплоэнергетике, углеродных материалов в химической промышленности и экологии и др.

Таблица 4 - Элементный состав продуктов полукоксования углей различных месторождений

Образец	Содержание, % мас.					
	Продукт	C	H	N	S	A
уголь Богатырь	Смола	85,56	9,45	0,28	отс.	-
	Полукокс	56,89	1,64	0,40	отс.	39,30
уголь Борлы	Смола	89,48	6,21	0,31	отс.	-
	Полукокс	27,80	0,91	0,41	0,18	70,10
уголь Майкубен	Смола	83,63	7,01	0,57	0,40	-
	Полукокс	81,52	1,03	0,77	отс.	12,46

Результаты элементного состава пиролизного газа показали, что основными ценными компонентами газообразных продуктов являются водород, метан, оксид углерода, а также в небольших количествах – этилен, этан, пропилен, пропан и др., содержащиеся в относительно небольших количествах (таблица 5).

Таблица 5 - Состав газа полукоксования углей различных месторождений

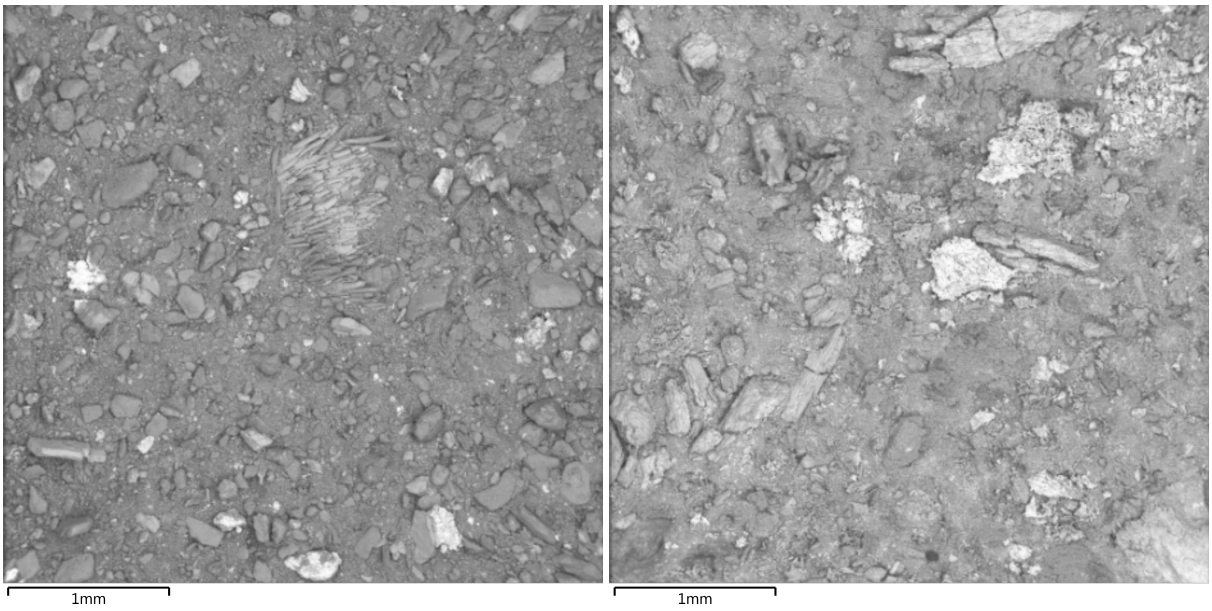
№	Компонент	Содержание, %		
		Богатырь	Борлы	Майкубен
1	Водород	20.5	17.3	21.4
2	Метан	6.5	11.3	6.5
3	Этилен	1.6	2.1	5.0
4	Этан	1.2	2.3	2.4
5	Пропилен	2.5	1.0	4.1
6	Пропан	1.0	5.8	5.4
7	i-Бутан	0.3	1.3	0.7
8	Транс-2-бутен	1.1	1.6	2.9
9	n-Бутан	1.4	2.4	3.3
10	1-бутен	0.2	0.3	0.3
11	Цис-2-бутен	0.3	0.5	0.7
12	i-Пентан	0.5	1.0	1.1
13	n-Пентан	0.7	1.3	1.9
14	n-Гексан	0.0	0.0	0.0
15	С6 – С8	0.6	0.7	0.7
16	Монооксид углерода	24.3	21.3	19.5
17	Диоксид углерода	37.3	29.8	23.7
18	Сероводород	0.0	0.00	0.4

При высокой температуре пиролиза уголь в основном подвергается реакциям конденсационной полимеризации, в ходе которых в газообразных продуктах образуется большое количество H_2 [11]. Образование CH_4 происходит главным образом за счет расщепления алифатических боковых цепей и метоксигрупп [12], что в основном происходит на стадии реакции деполимеризации угля, соответствующей температурному диапазону 280-550 °С. Быстрая скорость повышения температуры способствует тому, что угольный пласт (или слой) проходит через эту стадию реакции быстрее, что приводит к снижению выхода CH_4. Образование CO_2 в основном происходит в результате декарбоксилирования алифатических углеводородов в низкотемпературном диапазоне 200-460°С [13]. Также CO_2 может быть получено путем расщепления боковых цепей алифатических углеводородов с кислородсодержащими функциональными группами, в основном в более высоком диапазоне 460-610°С [14]. Вместе с тем, CO в основном образуется в результате вторичного крекинга смолы [15].

Результаты рентгенофлуоресцетного анализа образцов золы углей, представленные в таблице 6, показали, что основными компонентами являются оксиды кремния, алюминия и железа. В золе Богатырь наблюдаются в наибольшем количестве компоненты SiO_2 и Al_2O_3, сумма которых составляет почти 88%. Зола Майкубен, напротив, характеризуется относительно невысоким содержанием SiO_2 и Al_2O_3 (менее 75%) и большим содержанием Fe_2O_3 (≈15%). Микроснимки пиролизной золы данных углей приведены на рисунке 1.

Таблица 6 - Минеральный состав золы углей

Зола	Содержание, % мас.										
	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Na_2O	MgO	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO_2
Богатырь	22.51	65.00	5.51	0.51	0.61	0.78	0.35	0.53	2.63	1.34	0.23
Борлы	21.85	58.87	7.36	1.95	1.78	0.27	0.61	3.21	2.59	1.19	0.32
Майкубен	20.25	54.16	14.82	2.93	1.56	0.82	0.41	0.33	3.52	0.55	0.65



а) *б)*

Рис.1 - Микроснимки золы углей Богатырь (а) и Майкубен (б)

Микроскопический анализ золы, полученной при пиролизе различных углей, выявил существенные различия в морфологии поверхности, пористой структуре и степени спекания минеральной составляющей (рисунок 1). Зола угля Богатырь характеризуется относительно однородной морфологией с преобладанием округлых и овальных пор различного размера. Часть пор находится в сообщающемся состоянии, что свидетельствует о формировании развитой поровой сети. Поверхность частиц в целом гладкая, однако локально наблюдаются углубления и включения минеральной природы, при этом трещиноватость выражена слабо и ограничена микротрещинами. Степень спекания оценивается как умеренная: фиксируются отдельные зоны частичного плавления минеральной фазы, что способствует локальному слипанию частиц при сохранении общей пористости. В отличие от золы угля Богатырь, зола угля Майкубен имеет наиболее выраженную неоднородность, т.к. в структуре фиксируется сочетание крупных округлых пор и мелкопористых участков, распределенных неравномерно. Морфология поверхности варьируется от относительно гладкой (местами оплавленной) до грубозернистой. Трещиноватость высокоразвитая, при этом трещины различной протяженности образуют сетчатую конфигурацию. Степень спекания относительно высокая (по сравнению с золой угля Богатырь), т.к. в ряде областей наблюдается сплошное оплавление минеральной фазы и слияние ча-

стиц в монолитные агрегаты.

Выводы. Проведенное исследование пиролиза образцов углей показало, что данный процесс сопровождается преимущественным образованием твердого остатка–полукокса, при относительно незначительных выходах горючего газа и смолы. Полукокс, например, полученный от угля Майкубен, характеризуется достаточным количеством углерода (более 80 %), невысокой зольностью (около 12%) и отсутствием серы, что позволяет рассматривать такой продукт не только как качественное твердое бездымное топливо, но и в перспективе может использоваться как восстановитель в металлургических процессах. Газообразные продукты пиролиза исследуемых образцов углей, выход которых составил около 3-12%, отличаются относительно высоким содержанием горючих газов, таких как H_2, CO, CH_4 и могут быть вовлечены в энергетический баланс предприятий, повышая эффективность комплексного использования угля. Пиролизная смола, выход которой составил для всех образцов углей около 4-8%, представляет собой сырье для дальнейшей переработки с целью получения различных ценных химических продуктов с высокой добавленной стоимостью. Таким образом, процесс пиролиза обеспечивает производство энергоемких и химически ценных продуктов при одновременном снижении экологической нагрузки, что особенно актуально в условиях энергоперехода и поиска устойчивых решений в топливно-энергетическом комплексе.

Финансирование. *Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (№ BR21882171 «ЦУР 9.4: Развитие «зеленой» экономики Казахстана путем переработки минерального сырья и отходов методом пиролиза»).*

Литература

1. Yousuf M.U., Siddiqui M.A., Kumar M., Umair M. Life cycle assessment of lignite-fueled ultra-supercritical coal-fired power plant with evaluation of solar energy integration // Fuel. – 2025. – Vol.385:134079. DOI 10.1016/j.fuel.2024.134079.

2. Fabianska M., Kurkiewicz S. Biomarkers, aromatic hydrocarbons and polar compounds in the neogene lignites and gangue sediments of the Konin and Turoszow Brown coal basins (Poland) // International Journal of Coal Geology.-2013.-Vol.107.-P.24-44. DOI 10.1016/j.coal.2012.11.008.

3. Liu M., Yang J., Yang Y., Liu Z., Shi L., He W., Liu Q. The radical and bond cleavage behaviors of 14 coals during pyrolysis with 9,10-dihydrophenanthrene //Fuel. -2016.-Vol.182. - P.480-486. DOI 10.1016/j.fuel.2016.06.006.

4. Liu Z., Mu L., Feng C., Li X., Liu T., Jiang X., Bai H., Liu X. Generation and emission mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) during the coking process in Shanxi, China//Science of the Total Environment.-2024.-Vol.948:174619. DOI 10.1016/j.scitotenv.2024.174619.

5. Ju Y., Zhu Y., Zhang Y., Iglauer S., Pan B., Wang K. Microwave-aided pyrolysis and fragmentation of tar-rich coal and rocks for in situ coal conversion and clean utilization // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2023.-Vol.167: 105391. DOI 10.1016/j.ijrmms.2023.105391.

6. Baysal M., Yürüm A., Yıldız B., Yürüm Y. Structure of some western Anatolia coals investigated by FTIR, Raman, 13C solid state NMR spectroscopy and X-ray diffraction // International Journal of Coal Geology. - 2016. - Vol.163(1). - P.166-176. DOI 10.1016/j.coal.2016.07.009.

7. Liu Y., Yao Q., Sun M., Ma X. Catalytic fast pyrolysis of coal tar asphaltene over zeolite catalysts to produce high-grade coal tar: an analytical Py-GC/MS study // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. - 2021. - Vol.156: 105127. DOI 10.1016/j.jaap.2021.105127.

8. Che Y., Shi K., Cui Z., Liu H., Wang Q., Zhu W., Tian Y. Conversion of low temperature coal tar

into high value-added chemicals based on the coupling process of fast pyrolysis and catalytic cracking // Energy. - 2023. - Vol.264: 126169. DOI 10.1016/j.energy.2022.126169.

9. Ma Z.-H., Wei X.-Y., Liu G.-H., Liu F.-J., Zong Z.-M. Value-added utilization of high-temperature coal tar: a review // Fuel. - 2021. - Vol.292: 119954. DOI 10.1016/j.fuel.2020.119954.

10. Qiao Y., Chen Z., Wu X., Li Z. Investigation on co-combustion of semi-coke and bituminous coal in oxygen-enriched atmosphere: Combustion, thermal conversion, and kinetic analyses // Energy. -2023.- Vol.269: 126816. DOI 10.1016/j.energy.2023.126816.

11. Yang H., Li Y., Xie Z., Cheng Y., Han Z., Jin L., Li Y., Hu H. Increasing condensation polymerization at a higher heating rate during coal pyrolysis and its mechanism // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. -2024. -Vol.177: 106361. DOI 10.1016/j.jaap.2024.106361.

12. Wu Y., Tao S., Wang Z., Cui Y., Jing Q., He W., Guo J., Hai L., Pan Z. Effect of pyrolysis atmospheres on gaseous products evolution of coal pyrolysis at high temperature // Fuel. – 2024. -Vol.366: 131336. DOI 10.1016/j.fuel.2024.131336.

13. Wang S., Tang Y., Schobert H., Guo Y., Gao W., Lu X. FTIR and simultaneous TG/MS/FTIR study of Late Permian coals from Southern China // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. -2013. -Vol.100. -P. 75-80. DOI 10.1016/j.jaap.2012.11.021.

14. He X., Zhu H., Huo Y., Wang W. Study on the Formation Mechanism of the Pyrolysis Products of Lignite at Different Temperatures Based on ReaxFF-MD//An Open Access Journal from the American Chemical Society.-2021.-Vol.6 (51).-P.35572-35583. DOI 10.1021/acsomega.1c05275.

15. Tian B., Qiao Y., Bai L., Feng W., Jiang Y., Tian Y. Pyrolysis behavior and kinetics of the trapped small molecular phase in a lignite // Energy Conservation and Managemant.-2017.- Vol.140.- P.109-120. DOI 10.1016/j.enconman.2017.02.077.

Сведения об авторах

Нургалиев Н.У. - кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Научно-исследовательский институт Новых химических технологий при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан, e-mail: nurgaliev_nao@mail.ru;

Айбульдинов Е.К. - доктор PhD, Казахский университет технологии и бизнеса им.К.Кулажанова, Научно-исследовательский институт Новых химических технологий при Евразийском национальном университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, e-mail: elaman_@mail.ru;

Искакова Ж.Б. - кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Научно-исследовательский институт Новых химических технологий при Евразийском национальном университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, e-mail: zhanariskakova@mail.ru;

Колпек А. - кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, e-mail: aynagulk@mail.ru;

Сабитов А.С. - докторант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, e-mail: sawy552@gmail.com;

Кусепова Л.А. - кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, e-mail: kusepova71@mail.ru.

Information about the authors

Nurgaliyev N.U. - Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Research Institute of New Chemical Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: nurgaliev_nao@mail.ru;

Aybuldinov E.K. - PhD, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Research Institute of New Chemical Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: elaman_@mail.ru;

Iskakova Z.B. - Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Research Institute of New Chemical Technologies, L.N.

Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhanariskakova@mail.ru;

Kolpek A.- Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: aynagulk@mail.ru;

Sabitov A.S. - Doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana Kazakhstan, e-mail: sabitov_as_1@enu.kz;

Kusepova L.A. - Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: kusepova71@mail.ru.