

Оригинальная статья

Технологическая схема щелочной активации бурых углей Дальневосточного региона

Е. В. Ворсина[✉], Т. В. Москаленко, В. А. Михеев

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]labkiy@mail.ru

Аннотация

В статье показана актуальность развития теории и практики глубокой переработки угля, обусловленная современными трендами развития мировой угольной промышленности и прогнозом понижения спроса на уголь в энергетике за счет введения альтернативных источников энергии. Бурые угли, с учетом их богатейшей базы в Российской Федерации и уникальности их свойств ввиду низкой степени метаморфизма, весьма перспективны как сырье для производства сорбентов для очистки технологических, коммунальных и производственных сточных вод. Целью исследования является разработка технологической схемы щелочной активации бурых углей Дальневосточного региона, позволяющей получать высококачественные сорбенты для адсорбции из жидкой фазы. Исследование проводилось в лабораторных условиях на бурых углях четырех месторождений: Харанорское, Кангаласское, Кировское, Окино-Ключевское. Исследование вариантов проведения операций стадий (подготовки бурого угля к активации, щелочной активации и заключительной обработки) на основании анализа полученных величин адсорбционной активности по йоду позволило подобрать оптимальные параметры, набор и последовательность проведения операций. Разработанная принципиальная технологическая схема щелочной активации бурых углей гидроксидом калия, включает 14 операций, в том числе термовыщелачивание и механоактивацию, позволяет получать сорбенты с высокой адсорбционной активностью по йоду (более 90 %). Результаты исследований по получению сорбентов щелочной активацией бурых углей позволяют говорить о технологической осуществимости, высокой эффективности и перспективности этого направления переработки бурых углей месторождений Дальнего Востока.

Ключевые слова: углеродные сорбенты, бурый уголь, щелочная активация, адсорбционная активность по йоду, термоудар, термовыщелачивание, механоактивация

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0022, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800089-2).

Для цитирования: Ворсина Е.В., Москаленко Т.В., Михеев В.А. Технологическая схема щелочной активации бурых углей Дальневосточного региона. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(4):553–561. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-553-561>

Original article

Technological scheme for the alkaline activation of lignite coals in the Far Eastern Region

Elena V. Vorsina[✉], Tatiana V. Moskalenko, Valery A. Mikheev

*Chersky Mining Institute of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*
[✉]labkiy@mail.ru

Abstract

The article shows the relevance of the theory and practice of deep coal processing. The increasing relevance is based on modern trends in the development of the global coal industry and forecasts regarding the decrease in demand for coal in the energy sector due to the introduction of alternative energy sources. The Russian Federation has the richest raw material base of coals, including lignite. Due to the low degree of metamorphism, lignite's are unique in their

properties and are very promising as a raw material for the production of sorbents for the treatment of industrial, municipal and industrial wastewater. The aim of the study is to develop a process flow chart for alkaline activation of lignite coals in the Far Eastern region to obtain high-quality sorbents for adsorption from the liquid phase. The laboratory study was conducted on lignite coals from four deposits in the Far Eastern region (Kharanorskoye, Kangalasskoye, Kirovskoye, Okino-Klyuchevskoye deposits). General scientific and empirical methods were used: analysis and generalization of scientific literature on the research problem, experiment, analysis, comparison and mathematical processing of the obtained experimental data. A study was conducted of various options for carrying out three stages of the process of obtaining sorbents (preparation of lignite coal for activation, alkaline activation and final processing). Analysis of the obtained data on the sorption properties of the obtained samples made it possible to determine the optimal parameters and sequence of operations in the process of alkaline activation of lignite coals. A process flow chart for alkaline activation of lignite coals with potassium hydroxide has been developed, consisting of 14 operations, including thermal leaching and mechanical activation. Carrying out the process of alkaline activation of lignite according to this technological scheme allows obtaining sorbents with high adsorption activity for iodine (more than 90 %). The results of the research allow us to speak about the technological feasibility, high efficiency and prospects of processing lignite coals from deposits in the Far Eastern into sorbents..

Keywords: carbon sorbent, lignite coal, alkaline activation, iodine adsorption activity, thermal shock, thermal leaching, mechanical activation

Funding. This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297-2021-0022, reg. No. 122011800089-2).

For citation: Vorsina E.V., Moskalenko T.V., Mikheev V.A. Technological scheme for the alkaline activation of lignite coals in the Far Eastern Region. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):553–561. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-553-561>

Введение

Уголь является одним из самых распространенных полезных ископаемых в мире. Его промышленные запасы, которыми располагают более 50 стран в мире, составляют 506 млрд т. Добыча угля ведется практически во всех этих странах [1, 2]. Развитие угольной промышленности в мире в период 2000–2022 гг. шло опережающими темпами: потребление энергии в мире увеличилось на 52 %, а угля – на 63,5 % [3]. Объем мировой добычи угля в 2022 г. составил свыше 8,6 млрд т, что на 8,3 % выше, чем в 2021 г. [1].

Однако прогнозы развития добычи угля в основных странах мира показывают возможность изменения тренда повышающегося на снижающийся в перспективе. По прогнозам Международного энергетического агентства (МЭА), снижение мирового спроса на уголь будет происходить начиная с 2024 г. и в 2026 г. объем добычи угля в мире может снизиться на 2,6 % (до 8,28 млрд т). Падение спроса на уголь обусловлено значительным расширением мощностей возобновляемых источников энергии. К тому же, сокращение выбросов углекислого газа, в соответствии с целями Парижского соглашения, потребует более быстрого падения объемов использования угля [3–5].

Уголь в настоящее время является основным топливом для производства электроэнергии, стали и цемента, это основное направление его использования. Вместе с тем, нетопливное использование угля содержит обширный список веществ

и материалов, получаемых на его основе: синтетическое жидкое топливо, горный воск, пластмассы, красители, стабилизаторы, растворители, синтетические волокна, гуминовые удобрения, взрывчатые вещества, сорбенты, электроды, карбиды, аммиак, нафталин, уксусная кислота и многое другое [2, 6].

Российская Федерация располагает мощной сырьевой базой угля, способной полностью обеспечить потребности экономики страны в угле при топливном и нетопливном его использовании. По количеству угольных запасов, вовлеченных в промышленное освоение, Россия занимает третье место в мире (после Китая и Индии). Традиционно основными поставщиками российского угля остаются Сибирь и Дальний Восток. Но по темпам внедрения технологий глубокой переработки и комплексного использования углей угольная отрасль России существенно отстает, выделение инвестиций на эти цели предусмотрены только на 3-м этапе (2021–2030 гг.) долгосрочной программы развития угольной промышленности России.

С учетом современных трендов и прогнозов развития мировой угольной промышленности, богатейшей базы РФ и эффективной работы российских угледобывающих предприятий наметилась необходимость расширения областей практического применения угля за счет строительства и реконструкции перерабатывающих предприятий. Поэтому вопросы рационального комплексного использования, теории и практики глубокой

переработки углей, которые многократно поднимались и обсуждались в последние десятилетия и имеют существенные научные наработки, приобретают новую актуальность.

Строительство и модернизация перерабатывающих производств наряду с освоением и развитием минерально-сырьевой базы макрорегиона, включая горнодобывающую отрасль и топливно-энергетический комплекс, – основная приоритетная ориентация инвестиционных проектов на Дальнем Востоке в соответствии с Федеральной целевой программой «Экономическое и социальное развитие Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 г.». На период после 2025 г. стратегия развития макрорегиона, весьма вероятно, не подлежит изменениям.

Одним из перспективных направлений нетопливного использования угля является производство углеродных сорбентов (активных углей), в том числе для очистки водных сред [7–9]. Технологические параметры процесса переработки и пористой структуры получаемых сорбентов в значительной степени определяются стадией метаморфизма перерабатываемого сырья. Установлено, чем ниже степень метаморфизма перерабатываемого угля, тем шире ассортимент сорбционных материалов, которые можно получать на его основе [10]. Сорбенты на основе бурых углей характеризуются развитой структурой пор и пригодностью для очистки технологических, коммунальных и производственных сточных вод [11, 12]. Поэтому бурые угли весьма перспективны к широкому применению в производстве сорбентов

На долю бурых углей приходится более 53 % (146 млрд т) балансовых запасов и 31 % (17,5 млрд т) забалансовых запасов угля РФ по состоянию на 01.01.2023 г. Дальневосточные регионы страны обладают значительными совокупными запасами бурых углей, но основная их часть отнесена к запасам нераспределенного фонда ввиду их не востребоваемости. Добыча бурых углей обеспечивает порядка пятой части российской угледобычи. При этом бурый уголь, добываемый преимущественно для внутрисейского использования, характеризуется большим содержанием влаги и примесей и, как правило, не подлежит обогащению [1].

Вместе с тем из бурых углей по разным технологическим схемам можно получать следующие виды пористых материалов:

– полидисперсные сорбенты для удаления нефти и нефтепродуктов с водных и твердых поверхностей;

– дробленые мезопористые сорбенты для очистки сточных вод от высокомолекулярных органических соединений, например, нефти, красителей, поверхностно-активных веществ и др.;

– высококачественные гранулированные мезопористые сорбенты широкого спектра действия и носители для катализаторов различных процессов;

– дробленые и гранулированные пористые углеродные материалы с молекулярно-ситовым действием (углеродные молекулярные сита) для разделения воздуха с получением технически чистого азота [10].

Активирование углей (получение сорбентов) – сложный технологический процесс, состоящий из большого количества отдельных операций, которые в совокупности обеспечивают требования к свойствам получаемого продукта. Свойства исходного сырья, направление использования получаемых сорбентов и требования к их качеству, а также уже имеющиеся научные разработки и практический опыт в этой области делают процесс получения сорбентов из углей, в том числе бурых, многовариантным. Набор операций в процессе переработки угля в сорбенты, как и в другие продукты, непосредственно влияет на качество получаемого продукта. Эта работа посвящена разработке технологической схемы химической активации бурых углей Дальнего Востока.

Материалы и методы исследования

Процесс активирования угля заключается в термической его обработке в соответствующих условиях, в результате чего в структуре угля образуются многочисленные поры, щели, трещины и увеличивается площадь поверхности пор на единицу массы (удельная поверхность). Современные традиционные технологии получения сорбентов из твердого углеродсодержащего сырья базируются на процессах физической (парогазовой) или химической активации. Физическая активация заключается в термоокислительной обработке сырья при температурах 500–1000 °С в токе паров воды, CO₂ или воздуха, химическая – в пропитке углеродсодержащего материала химическими реагентами [13, 14]. Авторами разработана одностадийная технологическая схема парогазовой активации предварительно дробленного бурого угля, позволяющая

Технический анализ и сорбционные свойства бурых углей

Table 1

Preliminary quality characteristics of lignite coal

Показатель, %	Номер пробы			
	1	2	3	4
Лабораторная влага образца (W^l)	10,6	7,3	15,6	5,4
Содержание влаги аналитической (W^a)	11,1	6,9	9,1	4,7
Зольность на сухую массу (A^d)	7,5	11,8	8,7	9,1
Выход летучих веществ на сухое беззольное состояние (V^{daf})	45,7	52,3	49,3	41,9
Адсорбционная активность по йоду (X)	16,6	12,8	17,2	20,7

получать качественные сорбенты с адсорбционной активностью по йоду (X) до 50–58 % [15].

Среди преимуществ химической активации выделяют снижение температуры и сокращение времени процесса, а также снижение потерь твердого продукта на стадии активации [13]. Известно, что при химическом активировании углей можно получить значительное увеличение удельной поверхности, а также большую однородность структуры пор получаемых сорбентов [13, 16].

Одним из направлений химической активации является щелочная с применением в качестве активирующих агентов гидроксидов щелочных металлов, наиболее эффективным из которых, по ряду исследований, является гидроксид калия [17–21]. Метод щелочной активации гидроксидом калия лег в основу лабораторных исследований и разработки технологической схемы для получения из бурых углей сорбентов с высокими качественными характеристиками, которых невозможно добиться при парогазовой активации.

Лабораторные исследования на четырех пробах бурых углей месторождений Дальнего Востока: 1 – Харанорское (Забайкальский край), 2 – Кангаласское (Республика Саха (Якутия)), 3 – Кировское (Республика Саха (Якутия)), 4 – Окино-Ключевское (Республика Бурятия).

Показатели технического анализа и адсорбционная активность по йоду исходных бурых углей месторождений приведена в табл. 1.

В общем случае получение сорбентов методом химической активации углей включает в себя три основные стадии – подготовка сырья к активации, активирование и заключительная обработка продукта. Для определения оптимальных параметров проведения технологического процесса получения сорбентов из бурых углей были рассмотрены возможные варианты проведения

операций в пределах каждой стадии, их комбинаций и последовательности проведения. Эффективность проведения процесса оценивалась по величине адсорбционной активности по йоду (X , %) – чем выше величина, тем эффективнее вариант проведения процесса. Показатель адсорбционной активности по йоду в данной работе в качестве основного показателя, оценивающего качество получаемых сорбентов, является достаточным ввиду того, что позволяет судить о содержании в полученном сорбенте микропор с размерами эффективных диаметров широкого диапазона (0,6–1,5 нм) и о пригодности сорбента для очистки сточных вод от широкого спектра органических и неорганических соединений.

Стадия подготовки сырья к активации имеет важное значение, так как может привести те или иные изменения в его естественное состояние. По природе своего воздействия способы подготовки углесодержащего сырья к процессу активации можно разделить на следующие: механический, термический, химический, физический и комбинированный. При проведении стадии подготовки бурых углей к щелочной активации гидроксидом калия проводились исследования по изучению всех вышеперечисленных способов воздействия на сырье. Выявлено что наиболее эффективным способом подготовки бурого угля является применение механоактивации, а затем термовыщелачивания обработанного химическим активатором (гидроксидом калия) бурого угля. Такая комбинация позволяет увеличить величину адсорбционной активности по йоду на 17–33 % в сравнении с результатами щелочной активации без проведения дополнительной подготовки бурого угля [22].

Гидроксид калия в уголь вводился путем размешивания к углю раствора щелочи с последую-

**Качественные характеристики сорбентов,
полученных щелочной активацией бурых углей гидроксидом калия**

Table 2

**Qualitative characteristics of sorbents produced through the alkaline activation
of lignite coals with potassium hydroxide**

Показатель, %	Номер пробы			
	1	2	3	4
Содержание влаги аналитической (W^a)	9,2	4,5	11,2	3,2
Зольность на сухую массу (A^d)	4,0	16,8	12,9	13,8
Выход летучих веществ на сухое беззольное состояние (V^{daf})	41,4	11,7	13,7	9,9
Адсорбционная активность по йоду (X)	100,5	90,7	93,2	98,0
Выход сорбента с пересчетом на сухую массу (Y)	51,2	49,3	57,4	50,7
Степень обгара (доля угля, выгоревшего при активации) (L)	38,2	43,4	27,0	43,9

щим импрегнированием в течение 2 ч. Массовое соотношение КОН/бурый уголь было принято равным 1 г/г на основании исследований, результаты которых показали, что при этом соотношении адсорбционная активность по йоду полученных углеродных материалов находится на уровне требований к этому показателю высококачественных промышленно выпускаемых марок активных углей, имеющих спрос на рынке [19–21].

На стадии активации подготовленная углещелочная смесь подвергалась термолизу с последующей изотермической выдержкой без доступа воздуха. Варианты экспериментов различались по температуре (600, 700, 800 °С) и длительности (30, 45, 60 мин) проведения. При исследовании режима термолиза образцов, пропитанных КОН, рассматривалось два варианта его проведения: постепенный нагрев проб со скоростью 10 °С/мин до 800 °С в течение 1 ч 20 мин и термоудар – высокоскоростной нагрев проб до температуры 800 °С при последующей изотермической выдержке в течение 1 ч, последний из которых доказал свою большую эффективность в предшествующих исследованиях [23].

Операции стадии заключительной обработки полученных образцов в исследуемых вариантах были постоянными (неизменными) – дробление, промывка, сушка. Дробление полученных продуктов проводилось только при необходимости, если полученный продукт спекся. Промывка производилась сначала раствором 0,1 н. соляной кислоты, затем дистиллированной водой до нейтрального рН смывных вод. Промытый дробленный сорбент высушивался до воздушно-сухого

состояния в лабораторных условиях, после чего проводилось определение качественных характеристик и адсорбционной активности по йоду.

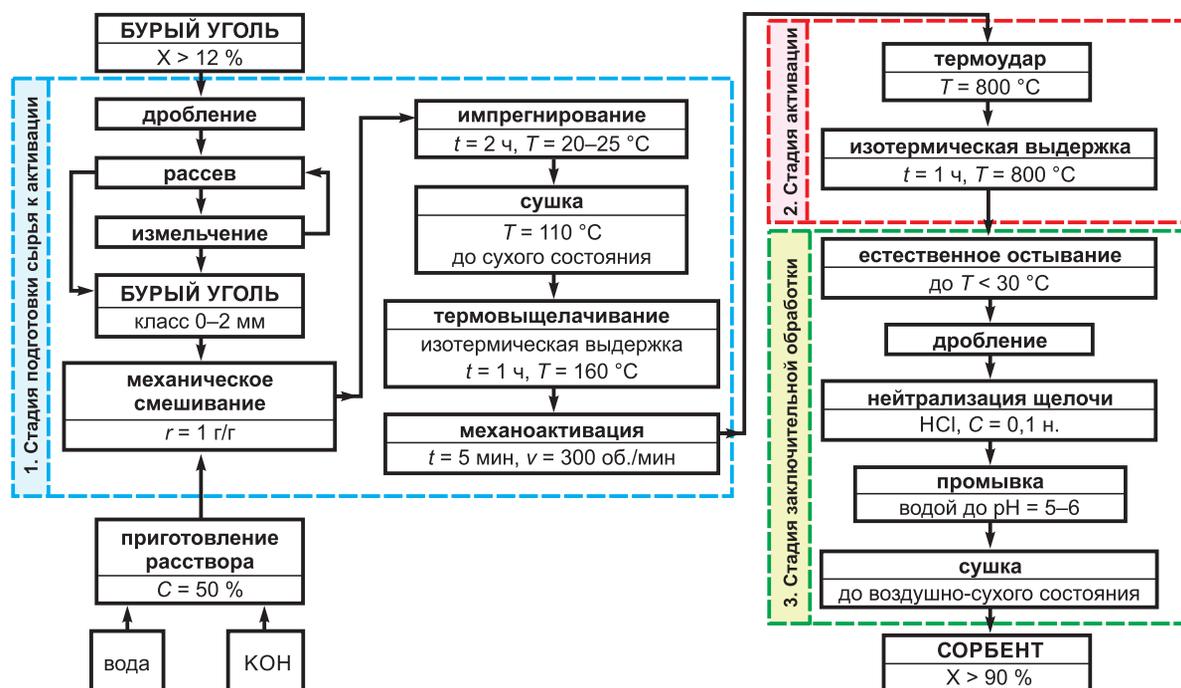
Результаты и обсуждение

Принципиальная технологическая схема процесса получения сорбентов из бурого угля составлена по результатам большого количества экспериментов, различающихся вышеописанными вариантами параметров проведения операций на бурых углях четырех месторождений Дальнего Востока (четыре серии). В каждой серии экспериментов выбирался наилучший вариант (один или несколько близких), который был основой для формирования группы из разных серий, но с одинаковыми параметрами проведения операций. Сравнительным анализом полученных групп по величине адсорбционной активности по йоду выбирался оптимальный вариант. Качественные характеристики сорбентов и адсорбционная активность по йоду сорбентов из бурых углей, послужившие основой для разработки технологической схемы, приведены в табл. 2.

Таким образом, исследования стадий технологического процесса и вариантов проведения операций в каждой стадии, анализ и обобщение данных позволили выбрать наилучшие результаты и скомпоновать принципиальную технологическую схему (см. рисунок).

Принципиальная технологическая схема процесса получения сорбентов состоит из 14 операций в трех стадиях:

1. Стадия подготовки сырья к активации. Операции: дробление, рассев, измельчение, меха-



Технологическая схема щелочной активации бурых углей (где r – весовое соотношение КОН/уголь; C – концентрация, %; t – время проведения операции, час; T – температура операции, °C; v – частота вращения, об./мин; X – адсорбционная активность по йоду, %)

Technological scheme for alkaline activation of brown coals (r – the weight ratio of KOH/coal; C – concentration, %; t – the operation time, hour; T – temperature of the operation, °C; v – the rotation frequency, rpm; X – the adsorption activity for iodine, %)

ническое смешивание, импрегнирование, сушка, термовыщелачивание, механоактивация.

Дробление, рассев и измельчение исходного угля производится до крупности менее 2 мм в закрытом цикле. Параллельно подготавливается раствор КОН концентрацией $C = 50\%$ для химической пропитки бурого угля. После чего производятся смешивание углеродсодержащего сырья с химическим реагентом при массовом соотношении КОН/бурый уголь 1 г/г и выдержка полученной смеси в течение 2 ч в закрытой таре.

В соответствии с результатами экспериментов в технологическую схему включены процессы термовыщелачивания и механоактивации [22]. Операция термовыщелачивания заключается в термическом воздействии на углещелочную смесь в сушильном шкафу при температуре 160 °C и изотермической выдержке в течение 1 ч. После термовыщелачивания проводится механоактивация сырья в планетарной мельнице в течение 5 мин при частоте вращения 300 об./мин.

2. Стадия активации. Операция: термолиз (термоудар и изотермическая выдержка). Термолиз

проводится в режиме термоудара при 800 °C с последующей изотермической выдержкой в течение 1 ч.

3. Стадия заключительной обработки. Операции: естественное остывание, дробление, нейтрализация щелочной среды соляной кислотой, промывка дистиллированной водой до нейтрального значения pH промывных вод, сушка до воздушно-сухого состояния.

По результатам экспериментов, проведенных по разработанной принципиальной технологической схеме щелочной активации бурого угля (см. табл. 2), видно, что величины адсорбционной активности по йоду исследуемых бурых углей всех четырех месторождений Дальнего Востока превышают значение 90 % с выходом готового продукта около 50 %. Такие значения адсорбционной активности по йоду достаточно высоки и находятся на уровне промышленно выпускаемых активных углей лучших марок для адсорбции из жидкой фазы.

Технологическая схема щелочной активации бурых углей может применяться и на бурых углях

других месторождений, обладающих качественными характеристиками, близкими к исследуемым углям.

Заключение

Разработанная принципиальная технологическая схема процесса щелочной активации бурых углей с проведением операций термовыщелачивания и механоактивации позволяет получить высококачественные сорбенты с адсорбционной активностью по йоду более 90 % для адсорбции из жидкой фазы.

Вместе с тем получение сорбентов по данной технологической схеме обладает недостатками, свойственными методу химической активации: введение больших количеств активирующих веществ и, как следствие, высокая трудоемкость, продолжительность и ресурсоемкость операции промывки с образованием большого объема загрязненных химическими реагентами промывных вод. Поэтому при проектировании внедрения технологической схемы в производство наряду с подбором оборудования, проведением оценки эффективности производства, расчетом технических и технико-экономических показателей с учетом многочисленных факторов должна быть также проведена обязательная оценка экологических рисков и разработаны мероприятия по предотвращению загрязнения окружающей среды.

Результаты исследований по получению дробленых сорбентов из бурых углей позволяют говорить о технологической осуществимости, высокой эффективности и перспективности данного направления нетопливного использования бурых углей месторождений Дальнего Востока. При прогнозируемом значительном понижении спроса на уголь в энергетике за счет введения альтернативных источников энергии нетопливное использование бурого угля, в том числе для получения сорбентов, в перспективе может играть существенную роль при освоении добываемых объемов угля на действующих предприятиях.

Список литературы / References

1. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). 2024. [Электронный ресурс] https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/
State report on the current status and use of mineral resources in the Russian Federation in 2022. Official in-

ternet resources of Ministry of natural resources and environment of the Russian Federation. 2024 [Electronic source] (In Russ.). https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii

2. Kuznetsov P.N., Ilyushetchkin A., Chupin D., Sukhorukova M. Coal industry and the use of coal in the Russian Federation. In: Osborne D. (ed.) *The Coal Handbook (Second edition): Towards cleaner coal utilization, in woodhead publishing series in energy*. Woodhead Publishing; 2023, pp. 301–320. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824327-5.00003-X>

3. Плакиткина Л.С., Плакиткин Ю.А., Дьяченко К.И. Современные тренды и прогноз развития угольной промышленности мира и России в условиях трансформации мировой экономики. *Уголь*. 2024;(3):44–51. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-3-44-51>

- Plakitkina L.S., Plakitkin Yu.A., Dyachenko K.I. Current trends and a forecast of coal industry development in Russia and worldwide in conditions of the world economy transformation. Part I. Existing trends in coal industry operation in Russia and worldwide since the beginning of the 21st Century. *Ugol'*. 2024;(3):44–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-3-44-51>

4. *Statistical Review of World Energy*. 2024(73):76 p. Available at: <https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads> (accessed: 28.10.2024)

5. Панков Д.А., Афанасьев В.Я., Байкова О.В., Трегубова Е.А. Анализ тенденций мирового рынка угля и направлений российского экспорта. *Уголь*. 2021;(3):23–26. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-3-23-26>

- Pankov D.A., Afanasiev V.Ya., Baykova O.V., Tregubova E.A. Global coal market review and Russian export trends. *Ugol'*. 2021;(3):23–26. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-3-23-26>

6. Song W., Zeng H., Wang B., et al. A review of low-rank coal-based carbon materials. *New Carbon Materials*. 2024;39(4):611–632. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(24\)60872-3](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(24)60872-3)

7. Monser L., Adhoum N. Modified activated carbon for the removal of copper, zinc, chromium, and cyanide from wastewater. *Separation and Purification Technology*. 2002;26(2-3):137–146. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(01\)00155-1](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(01)00155-1)

8. Manoilova L., Ruskova K. Active carbons and their functional applications in water purification – an overview. *MATEC Web of Conferences*. 2022;366. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236604001>

9. Rivera-Utrilla J., Sánchez-Polo M., Gómez-Serrano V., et al. Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview. *Journal of Hazardous Materials*. 2011;187(1–3):1–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.033>

10. Peredery M.A., Sirotin P.A., Kazakov V.A., Khotuleva V.N. Wasteless processing of brown coals for production of porous carbonaceous general-purpose materials. *Solid Fuel Chemistry*. 2002;36(6):15–21.

11. Skodras G., Orfanoudaki Th., Kakaras E., Sakellaropoulos G.P. Production of special activated carbon from lignite for environmental purposes. *Fuel Processing Technology*. 2002;77–78:75–87. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00062-0)
12. Sakintuna B., Yürüm Y., Çetinkaya S. Evolution of carbon microstructures during the pyrolysis of Turkish Elbistan lignite in the temperature range 700–1000 °C. *Energy and Fuels*. 2004;18(3):883–888. <https://doi.org/10.1021/ef0301809>
13. Marsh H., Rodriguez-Reinoso F. *Activated Carbon*. Elsevier Science; 2006. 554 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044463-5.X5013-4>
14. Bhatnagar A., Hogland W., Marques M., Sillanpää M. An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering Journal*. 2013;(219):499–511. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.038>
15. Ворсина Е.В., Москаленко Т.В., Михеев В.А. Технологическая схема проведения парогазовой активации бурого угля. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(7-1):137–147. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_71_0_137
- Vorsina E.V., Moskalenko T.V., Mikheev V.A. Technological scheme for steam-gas activation of brown coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):137–147. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/023614932024710137>
16. Chiang H.L., Huang C.P., Chiang P.C. The surface characteristics of activated carbon as affected by ozone and alkaline treatment. *Chemosphere*. 2002;47(3):257–265. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00215-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00215-6)
17. Lillo-Ródenas M.A., Cazorla-Amorós D., Linares-Solano A. Understanding chemical reactions between carbons and NaOH and KOH. An insight into the chemical activation mechanism. *Carbon*. 2023;41:267–275. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00279-8](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00279-8)
18. Skripkina T., Bychkov A., Tikhova V., et al. Mechanochemically oxidized brown coal and the effect of its application in polluted water. *Environmental Technology and Innovation*. 2018;11:74–82. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.04.010>
19. Kucherenko V.A., Shendrik T.G., Tamarkina Y.V., Mysyk R.D. Nanoporosity development in the thermal-shock KOH activation of brown coal. *Carbon*. 2010;48(15):4556–4558. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.07.027>
20. Manina T.S., Fedorova N.I., Semenova S.A., Ismagilov Z.R. Influence of alkali treatment on the properties of adsorbents based on naturally oxidized kuznets basin coal. *Coke and Chemistry*. 2013;56(5):178–181 <https://doi.org/10.3103/s1068364x13050037>
21. Vorsina E.V., Moskalenko T.V., Mikheev V.A. The generation of absorption qualities of lignite adsorbents under conditions of alkali activation. In: *International science and technology conference “Earth Science” IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science IOP Publishing*. 2020;459. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052056>
22. Ворсина Е.В., Москаленко Т.В., Михеев В.А. Исследование способов подготовки бурого угля к проведению щелочной активации при получении сорбентов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(12-1):59–68. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_59
- Vorsina E.V., Moskalenko T.V., Mikheev V.A. Methods of alkaline activation pretreatment of lignite for production of adsorbents. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12-1):59–68. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_59
23. Ворсина Е.В., Москаленко Т.В., Михеев В.А. Получение сорбентов из бурых углей Харанорского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(S24):146–153. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-11-24-146-153>
- Vorsina E.V., Moskalenko T.V., Mikheev V.A. Production of sorbents from brown coals of the Kharanor deposit. *MIAB. Mining. Inf. Anal. Bull.* 2017;(S24):146–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-11-24-146-153>

Об авторах

ВОРСИНА Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0008-0088-7373>, ResearcherID: LOS-0331-2024, Scopus Author ID: 57200417340, SPIN: 6204-4072, e-mail: labkiy@mail.ru

МОСКАЛЕНКО Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2782-2488>, ResearcherID: AFN-8465-2022, Scopus Author ID: 6603241867, SPIN: 2511-1371, e-mail: labkiy@mail.ru

МИХЕЕВ Валерий Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0009-1531-4516>, ResearcherID: LPQ-0824-2024, Scopus Author ID: 57198098218, SPIN: 2112-1576 e-mail: labkiy@mail.ru

Вклад авторов

Ворсина Е.В. – разработка концепции, проведение статистического анализа, проведение исследования, редактирование рукописи; **Москаленко Т.В.** – проведение статистического анализа, проведение исследования, ре-

дактирование рукописи; **Михеев В.А.** – проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, редактурирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

VORSINA, Elena Vladimirovna, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Senior Researcher, <https://orcid.org/0009-0008-0088-7373>, ResearcherID: LOS-0331-2024, Scopus Author ID: 57200417340, SPIN: 6204-4072, e-mail: labkiy@mail.ru

MOSKALENKO, Tatiana Vladimirovna, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2782-2488>, ResearcherID: AFN-8465-2022, Scopus Author ID: 6603241867, SPIN: 2511-1371, e-mail: labkiy@mail.ru

MIKHEEV, Valery Alexandrovich, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0009-0009-1531-4516>, ResearcherID: LPQ-0824-2024, Scopus Author ID: 57198098218, SPIN: 2112-1576 e-mail: labkiy@mail.ru

Authors' contribution

Vorsina E.V. – conceptualization, formal analysis, investigation, writing – review & editing; **Moskalenko T.V.** – formal analysis, investigation, writing – review & editing; **Mikheev V.A.** – investigation, resources, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 01.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 21.11.2024

Принята к публикации / Accepted 27.11.2024