

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ПАРОГАЗОВОЙ АКТИВАЦИИ БУРОГО УГЛЯ

Е.В. Ворсина<sup>1</sup>, Т.В. Москаленко<sup>1</sup>, В.А. Михеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН»,  
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН, Якутск, Россия,  
e-mail: labkiy@mail.ru

**Аннотация:** Технологическая схема представляет собой последовательный перечень всех операций и процессов обработки сырья для получения сорбентов, начиная с момента его приема и заканчивая выпуском готовой продукции. Определены оптимальные параметры проведения парогазовой активации бурых углей Харанорского, Кангаласского, Кировского и Окино-Ключевского месторождений: активация без стадии карбонизации, расход парогазового реагента – 250–300 мл/ч, термолиз при 800 °С, время воздействия парогазовой активации при изотермической выдержке – 60 мин. Выявленные оптимальные параметры процесса, а также наиболее эффективная последовательность проведения операций заложены в основу технологической схемы парогазовой активации бурых углей. Разработанная принципиальная технологическая схема процесса получения сорбентов способом парогазовой активации позволяет получать качественные сорбенты с адсорбционной активностью по йоду не менее 50%. Активированные угли с такими качественными характеристиками в настоящее время находят широкое применение в пищевой, химической, фармацевтической, газо- и нефтеперерабатывающей промышленности, а также при очистке сточных вод и флотации руд цветных металлов. Применение разработанной технологической схемы процесса получения сорбентов способом парогазовой активации с прогнозируемым результатом величины адсорбционной активности по йоду возможно на бурых углях других месторождений с близкими исходными качественными характеристиками.

**Ключевые слова:** бурый уголь, парогазовая активация, углеродные сорбенты, активный уголь, адсорбционная активность по йоду, изотермическая выдержка, термодар.

**Для цитирования:** Ворсина Е. В., Москаленко Т. В., Михеев В. А. Технологическая схема проведения парогазовой активации бурого угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 137–147. DOI: 10.25018/023614932024710137.

### Technological scheme for steam-gas activation of brown coal

E.V. Vorsina<sup>1</sup>, T.V. Moskalenko<sup>1</sup>, V.A. Mikheev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences», N.V. Chersky Mining Institute of the North,  
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia, e-mail: labkiy@mail.ru

**Abstract:** The technological scheme is a sequential list of all operations and processes for processing raw materials to obtain sorbents. The scheme begins with the receipt of raw materials and ends with the release of finished products. The article defines the optimal parameters for

steam-gas activation of brown coals of the Kharanorsky, Kangalassky, Kirovsky and Okino-Klyuchevskoye deposits: activation without carbonization step, steam-gas reagent consumption – 250–300 ml/hour, thermolysis at 800 °C, exposure time of steam-gas activation during isothermal holding – 60 min. Optimal process parameters and the most efficient sequence of operations are the basis of the technological scheme of steam-gas activation of brown coal. The developed process flow diagram for the process of obtaining sorbents by the steam-gas activation method makes it possible to obtain high-quality sorbents with an iodine adsorption activity of at least 50%. Activated carbons with such qualitative characteristics are currently widely used in the food, chemical, pharmaceutical, gas and oil processing industries, as well as in wastewater treatment and flotation of non-ferrous metal ores. The application of the developed technological scheme for the process of obtaining sorbents by the method of steam-gas activation with the predicted result of the value of adsorption activity for iodine is possible on brown coals from other deposits with similar initial quality characteristics.

**Key words:** brown coal, steam-gas activation, carbon sorbents, activated carbon, iodine adsorption activity, isothermal exposure, thermal shock.

**For citation:** 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]. DOI: 10.25018/023614932024710137.

---

## Введение

Сорбенты (активные угли) в настоящее время применяются очень широко в различных отраслях промышленности, и объемы их потребления неуклонно возрастают с каждым годом [1–3]. Основные процессы отраслей промышленности, в которых используются активные угли, следующие:

- газо- и нефтеперерабатывающая отрасль: в процессах разделения и очистки технологических потоков, извлечения бензина и тяжелых углеводородов из попутных нефтяных и природных газов, очистки природного газа от примесей серы и др.;

- энергетическая отрасль: очистка возвратного парового конденсата на тепловых электростанциях от масла и других примесей, очистка добавочной, подпиточной и охлажденной воды на тепловых и атомных электростанциях и др. [4, 5];

- атомная отрасль: очистка от радионуклидов цезия, стронция, кобальта, сурьмы, серебра, бериллия, многозаряд-

ных анионов кремния, мышьяка, молибдена, хрома, селена, фосфора, железа, марганца, алюминия, аминов, токсичных и тяжелых металлов, сероводорода, аммиака, активного хлора и др. [6, 7];

- металлургическая отрасль: при флотации руд цветных металлов, в гидрометаллургии золота и др. [3];

- химическая отрасль: при производстве химических волокон, синтетического каучука, красителей, химических реактивов, катализаторов, получении йода, брома и их соединений, органических соединений, смол, в производстве пластификаторов, в реакциях окисления-восстановления, галогенирования, полимеризации в качестве катализаторов или носителей катализаторов и др. [2, 8];

- медицина: производство фармацевтических препаратов, очистка и фильтрация растворов, производство антибиотиков и очистка сточных вод от антибиотиков, производство лекарственных средств, витаминов, очистка штаммов бактерий (например, производство бифидобактерина), производство космети-

ческих средств, препаратов для энтерои гемосорбции и др. [2, 9]. Кроме того, сорбенты сами являются лекарственными препаратами, которые нейтрализуют токсины, поглощая их;

- пищевая промышленность: для очистки крахмалопаточных растворов, сахаросодержащих растворов и сиропов, глюкозы, в ликероводочном производстве, для обработки вин и водно-спиртовых растворов, а также при производстве соков и напитков [2, 3];

- сельское хозяйство: в растениеводстве в качестве улучшителя почв различного гранулометрического состава и поглотителя фитотоксикантов и других вредных веществ [3, 10];

- экологическое направление: затрагивает практически все отрасли промышленности и сферы жизни человека: очистка газовых выбросов, промышленных газов, в том числе дыма, очистка сточных вод, очистка питьевой воды, локализация и ликвидация последствий аварий, связанных с разливом нефти, нефтепродуктов и токсичных органических веществ на почву и водную поверхность, и др. [2, 3, 11].

Под каждую задачу подходят сорбенты с определенными физико-химическими характеристиками [1, 3] (основными из которых являются размер пор, адсорбционная емкость, адсорбционная способность, прочностные характеристики, долговечность) с учетом их стоимости, простоты и экологической безопасности применения. Определяющее влияние на структуру и размер пор сорбентов оказывают вид исходного сырья и методы получения. По сравнению с другими адсорбционными материалами (силикагели, цеолиты, алюмогели, иониты и другие), активированные угли являются уникальными адсорбентами в силу своих гидрофобных свойств.

Основное назначение активных углей — фильтрующие средства. В боль-

шинстве направлений применения активный уголь должен обладать следующими свойствами:

- слабое взаимодействие с молекулами воды (адгезия);
- сильно выраженное взаимодействие с органическими веществами;
- определенные размеры пор (например, для больших и сложных органических молекул важна крупнопористость с эффективным радиусом адсорбционных пор в пределах от 0,8 до 5,0 нм);
- достаточная прочность;
- соответствие требованиям по гранулометрическому составу;
- малая каталитическая активность по отношению к реакциям окисления, конденсации и др.;
- низкая удерживающая способность для возможной последующей регенерации;
- сохранение при регенерации (или если уменьшение, то незначительное) адсорбционной емкости;
- обеспечение большого числа циклов работы.

### Методы

В настоящее время существует множество способов получения активных углей, которые могут использоваться в зависимости от типа исходного сырья и его свойств, назначения получаемого продукта [2 — 4].

Каждый из этих способов формирует специфические свойства сорбентов, необходимых в различных процессах очистки сред, обладает своими преимуществами и недостатками. Это позволяет подбирать из разработанных и опробованных способов, в том числе и широко применяемых в промышленности, определенный набор операций по воздействию на исходное сырье в зависимости от его качественных характеристик и требований потребителя к получаемому продукту.

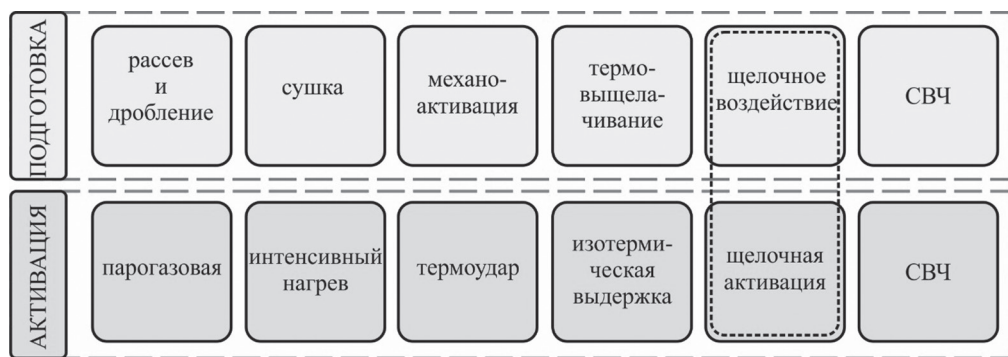


Рис. 1. Набор операций на стадиях подготовки и активации для составления технологических схем процесса получения сорбентов

Fig. 1. A set of operations-component at the stages of preparation and activation for drawing up technological schemes for the process of obtaining sorbents

Последовательный перечень всех операций и процессов обработки сырья для получения сорбентов, начиная с момента его приема и заканчивая выпуском готовой продукции, представляет собой технологическую схему. В соответствии с проведенными в лаборатории комплексного использования углей ИГДС СО РАН экспериментами набор всех наиболее эффективных операций по основным стадиям получения сорбентов из твердого углеродсодержащего сырья (ископаемых углей) приведен на рис. 1.

Качество активного угля характеризуется, в первую очередь, его сорбционной активностью — величиной адсорбции по определенному виду сорбата. Наиболее универсальным сорбатом является йод. Адсорбционная активность по йоду (йодное число) — масса йода, которую может адсорбировать навеска активного угля из водного раствора йода заданной концентрации (мг/г или%). Ее величина является достаточно показательной, так как имеет прямую зависимость от удельной поверхности активного угля и позволяет судить о содержании в адсорбенте микропор с размерами эффективных диаметров более широкого диапазона 0,6 — 1,5 нм, в сравнении с адсорбционной активностью по мети-

ловому спирту (около 0,4 нм), бензолу (около 0,6 нм). Полученные результаты адсорбционной активности по йоду позволяют судить о пригодности активного угля для извлечения йода из водных растворов и для очистки сточных вод от широкого спектра органических и неорганических загрязнений. Поэтому в работе величина адсорбционной активности по йоду рассматривается как основной показатель уровня активности сорбентов, достаточный для оценки эффективности операций технологической схемы их получения.

Реализуемые в производственной практике технологии активных углей базируются в основном на использовании методов парогазовой и химической активации разнообразных углеродсодержащих материалов [3].

Известно, что способом химической активации ископаемых углей гидроксидами щелочных металлов возможно получение сорбентов с хорошо развитой микроструктурой и высокой адсорбционной способностью. Удельная поверхность таких углеродных сорбентов превышает 700 м<sup>2</sup>/г, достигая при некоторых активирующих агентах 1000 м<sup>2</sup>/г и выше [12 — 18]. Вместе с тем на рынке существует значительный спрос и на сор-

бенты с более низкой адсорбционной способностью. В РФ имеется несколько крупных производителей, в ассортименте которых есть такие марки активных углей с адсорбционной активностью по йоду ( $X$ , %) ниже или около 50%, регламентированной ГОСТом или ТУ, например:

- не менее 30%: марки ДАК (Пермский завод сорбентов «УралХимСорб», ЗАО «Экспериментальный химический завод»), ДАК-5 (Пермский завод сорбентов «УралХимСорб»);

- не менее 45%: марки КДС, КДС-О, КДС-А (АО «НПО «Неорганика»), ОУ-ВК (Пермский завод сорбентов «УралХимСорб»), ОУ-А, ОУ-Б, ОУ-В (ЗАО «Экспериментальный химический завод»), БАУ, БАУ-К (Пермский завод сорбентов «УралХимСорб»);

- не менее 50%: — марка БАУ-Ац (ЗАО «Тюменский пиролизный завод», ЗАО «Экспериментальный химический завод»).

Такие активированные угли, наряду с зарубежными марками, находят широкое применение в пищевой, химической, фармацевтической, газо- и нефтеперерабатывающей промышленности, а также при очистке сточных вод и флотации руд цветных металлов.

Получение активных углей с адсорбционной активностью по йоду  $X = 30$ –50% возможно при парогазовой активации ископаемых углей, которая в настоящее время стала основным методом получения активных углей в промышленных масштабах. Этот метод технологически прост, экологически безопасен и позволяет использовать широкую гамму углеродсодержащего сырья — от древесных опилок до антрацитов [3]. Уникальным преимуществом парогазовой активации является также сохранение природной микроструктуры сырья в конечном активированном угле, что невозможно в химическом процессе активации [19].

Целью исследования являлась разработка оптимальной технологической схемы процесса получения сорбентов из бурых углей на основе способа парогазовой активации.

Поэтому щелочное воздействие активизирующими агентами и воздействие СВЧ в рамках этой работы не рассматривается.

Кроме последовательности операций технологическая схема должна включать принятые решения по оптимальным параметрам каждого процесса (длительность операций или процесса, температура, степень измельчения и т.д.). Определение этих параметров в ходе проведения экспериментальной части работы являлось основной задачей исследования. Оптимальный набор параметров устанавливался для каждого вида используемого сырья в соответствии с требуемым уровнем качества получаемого сорбента (с адсорбционной активностью по йоду  $X \leq 50\%$ ) и был сведен в общую технологическую схему.

### **Экспериментальная часть**

Исследования проводились на бурых углях следующих месторождений Дальнего Востока: Харанорское (Забайкальский край), Кангаласское, Кировское (Республика Саха (Якутия)), Окино-Ключевское (Республика Бурятия). Данные технического анализа (лабораторная и аналитическая влага образца, зольность на сухую массу, выход летучих веществ на сухое беззольное состояние) и исходная адсорбционная активность по йоду бурых углей этих месторождений приведены в табл. 1.

Парогазовая активация бурого угля проводилась на экспериментальной лабораторной установке, смонтированной на основе муфельной печи и позволяющей проводить парогазовую активацию при температуре до 900 °С, в том числе в режиме термоудара [20].

Таблица 1

**Технический анализ и сорбционные свойства бурых углей**  
**Initial quality characteristics of brown coal**

Месторождение	Показатели технического анализа, %				X, %
	$W^L$	$W^a$	$A^d$	$V^{daf}$	
Харанорское	10,6	11,1	7,5	45,7	16,6
Кангаласское	8,4	9,7	12,0	52,3	9,8
Кировское	11,8	12,1	8,4	48,8	18,0
Окино-Ключевское	5,4	4,7	9,1	41,9	20,7

Примечание:  $W^L$  — общая влага лабораторной пробы, %;  $W^a$  — содержание влаги аналитической пробы, %;  $A^d$  — зольность на сухую массу, %;  $V^{daf}$  — выход летучих веществ на сухое беззольное состояние, %; X — адсорбционная активность по йоду, %.

Основным узлом лабораторной установки является реторта, выполненная из нержавеющей стали в виде полый цилиндрической камеры с крышкой. Реторта устанавливается в муфельную печь. Конструкция реторты позволяет производить загрузку сырья при любой температуре, в том числе для осуществления термоудара за счет сброса сырья в камеру, разогретую до необходимых температур (от 400 до 900 °С). Контроль температуры осуществляется посредством термопары, установленной в центре реторты. Для осуществления процесса активации предусмотрен подвод водяного пара из парогенерирующего устройства в реторту по паропроводящей магистрали. Также предусмотрен отвод образующихся в процессе нагревания угля газов в накопитель продуктов конденсации через газоотводящую магистраль.

На стадии подготовки сырья исходная проба бурого угля просушивалась, после чего дробилась до крупности менее 2 мм. Исследовались варианты с предварительным просушиванием до постоянной массы и без него. Проба угля массой 100–150 г помещалась в уже нагретую до заданной температуры реторту лабораторной установки, т.е. применялся режим термоудара, как наиболее эффективный по сравнению с постепен-

ным нагревом. Парогазовая активация бурого угля для получения сорбентов проводилась как по классической схеме двухстадийного процесса (последовательно карбонизация, а затем активация), так и в одну стадию (подача газового реагента сразу). В качестве газового агента применялись водяной пар или смесь водяного пара и углекислого газа, расход воды для их образования регулировался в процессе проведения экспериментов. Температура проведения изотермической выдержки образцов исследовалась в диапазоне от 600 до 900 °С (с шагом 50 °С) при продолжительности 30, 45, 60 и 75 мин. По истечении заданного времени процесса реторта извлекалась из муфельной печи и охлаждалась до комнатной температуры. Полученные образцы при необходимости дробили до порошкообразного состояния и проводили оценку их качественных свойств: аналитическую влагу образца, зольность на сухую массу, выход летучих веществ на сухое беззольное состояние, адсорбционную активность по йоду.

### Результаты и обсуждение

В процессе экспериментальных исследований проведения парогазовой активации бурых углей вышеуказанных четырех месторождений сформирована база данных с различными параметрами

как подготовки, так и непосредственно проведения активации. Из обширного числа полученных экспериментальных данных выбирались данные по образцам с большими значениями адсорбционной активности по йоду. Далее из их числа выбирались варианты проведения парогазовой активации с точки зрения меньшей энергозатратности, а следовательно, и экономичности проведения процесса.

Так, например, величина адсорбционной активности по йоду при двухстадийном процессе (карбонизация и последующая активация водяным паром) сопоставима с этой же величиной продуктов, полученных при применении только одной стадии активации водяным паром. Таким образом, для исследуемых бурых углей пропадает необходимость проведения стадии карбонизации. Исключение стадии карбонизации позволит значительно экономить временные и энергетические затраты на получение сорбентов при парогазовой активации.

Данная выборка позволила определить оптимальные параметры проведения парогазовой активации бурых углей: активация без стадии карбонизации, расход парогазового реагента — 250—300 мл/ч, термолиз при 800 °С, время

воздействия парогазовой активации при изотермической выдержке — 60 мин. Результаты экспериментов парогазовой активации изучаемых углей с вышепеченными оптимальными параметрами процесса приведены в табл. 2.

Дальнейший анализ приведенных результатов позволил построить принципиальную технологическую схему процесса получения сорбентов из бурого угля. Основной технологической схемой является процесс парогазовой активации, который позволяет получать сорбенты с адсорбционной активностью по йоду не менее 50% (рис. 2).

Разработанная технологическая схема включает в себя следующие стадии и процессы:

1. Стадия подготовки. На этой стадии проводится технический анализ используемого сырья, рассев и измельчение угля до крупности менее 2 мм в закрытом цикле. Данная операция обеспечивает однородный состав исходного сырья.

2. Стадия активации. Активация бурого угля проводится без предварительной карбонизации в режиме термоудара при 800 °С с последующей изотермической выдержкой и подачей водяного пара в течение 60 мин. Оптимальный

Таблица 2

**Качественные характеристики сорбентов, полученных способом парогазовой активации при оптимальных параметрах процесса**  
**Qualitative characteristics of sorbents obtained during steam-gas activation in optimal parameters**

Месторождение	Показатели технического анализа, %			X, %	Y, %	L, %
	W <sup>a</sup>	A <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>			
Харанорское	12,0	20,5	12,9	53,9	47,3	42,1
Кангаласское	1,3	28,6	9,8	50,8	45,1	46,5
Кировское	2,2	18,2	7,8	58,2	47,1	41,1
Окино-Ключевское	3,2	13,1	9,4	56,3	47,9	46,7

Примечание: Y — выход сорбента с пересчетом на сухую массу, %:  $Y = m_c^0/m^d \cdot 100$ , %, где  $m_c^d$  — масса сухого сорбента, г;  $m^d$  — сухая масса навески угля, г; L — степень обгара (потеря органической массы в результате выгорания при получении сорбента, %:  $L = 100 - W^l - Y$ , %.

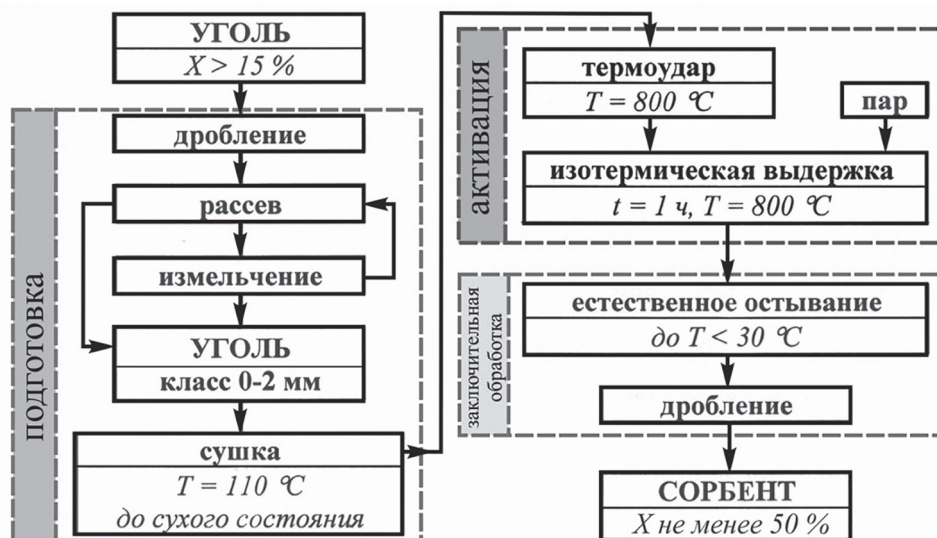


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема процесса получения сорбентов с адсорбционной активностью по йоду ( $X$ ) не менее 50% способом парогазовой активации из бурого угля:  $t$  – время проведения операции, ч;  $T$  – температура операции, °C.

Fig. 2. Schematic diagram of the process of obtaining sorbents from brown coal to obtain an adsorption activity for iodine ( $X$ ) of at least 50% by the method of steam-gas activation:  $t$  – is the operation time, hour;  $T$  – operation temperature, °C

расход воды для генерации пара составляет 250 – 300 мл/ч.

3. Стадия заключительной обработки. Заключительная обработка полученного твердого продукта включает в себя операции по дроблению полученного сорбента.

### Выводы

Исследование процесса переработки бурых углей месторождений Харанорское, Кангаласское, Кировское и Окино-Ключевское в сорбенты способом парогазовой активации позволило установить наиболее эффективную последовательность проведения операций и оптимальные параметры процесса получения сорбентов с заданными характеристиками.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ легли в основу разработки принципиальной технологической схемы процесса получения сорбентов способом парогазовой активации,


позволяющей получать качественные сорбенты с адсорбционной активностью по йоду не менее 50%. Полученные образцы сорбентов по значению адсорбционной активности по йоду сопоставимы с требованиями к этой величине востребованных промышленно выпускаемых в РФ активных углей марок ДАК, ДАК-5 ( $X \geq 30\%$ ), КДС, КДС-О, КДС-А, ОУ-А, ОУ-Б, ОУ-В, БАУ, БАУ-К ( $X \geq 30\%$ ) и БАУ-Ац ( $X \geq 50\%$ ). Выход сорбента с пересчетом на сухую массу при установленных параметрах процесса технологической схемы составил более 45%.

Применение разработанной технологической схемы процесса получения сорбентов способом парогазовой активации с прогнозируемым результатом величины адсорбционной активности по йоду  $X$  не менее 50% возможно на бурых углях других месторождений с близкими исходными качественными характеристиками.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ketabch M. R., Babamohammadi S., Davies W. G., Gorbounov M., Masoudi Soltani S.* Latest advances and challenges in carbon capture using bio-based sorbents. A state-of-the-art review // *Carbon Capture Science & Technology*. 2023, vol. 6. DOI: 10.1016/j.ccst.2022.100087.
2. *Кинле Х., Бадер Э.* Активные угли и их промышленное применение. — Л.: Химия, 1984. — 215 с.
3. *Мухин В. М., Клушин В. Н.* Производство и применение углеродных адсорбентов. — М.: Изд-во РХТУ, 2012. — 305 с.
4. *Marsh H., Rodriguez-Reinoso F.* Activated Carbon. Elsevier Science Technology Books, 2006, 536 p.
5. *Кельцев Н. В.* Основы адсорбционной техники. — М.: Химия, 1984. — 511 с.
6. *Suliman M. A., Sajid M., Nazal M. K., Islam M. A.* Carbon-based materials as promising sorbents for analytical sample preparation: Recent advances and trends in extraction of toxic metal pollutants from various media // *TrAC — Trends in Analytical Chemistry*. 2023, vol. 167, article 117265. DOI: 10.1016/j.trac.2023.117265.
7. *Фенелонов В. Б.* Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. — 414 с.
8. *Jia J. B., Du H. H., Huang G. X., Liu Q. R., Xing B. L., Zhang C. X., Guo H. Y., Pan J. N.* Research progress in non-energy utilization of lignite // *Xiandai Huagong. Modern Chemical Industry*. 2018, vol. 38, no. 6, pp. 24–27. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2018.06.006.
9. *Zhao M.-H., Bai X., Fan X., Li Y., Liu Y., Huang J.-L., Mo W.-L., Wei X.-Y., Saikia B. K.* Removal behaviors of phenol from aqueous solution using industrial coal sludge-derived porous carbon sorbent // *Journal of Molecular Liquids*. 2023, vol. 385, no. 1, article 1224271. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.122427.
10. *Kabiri S., Navarro D. A., Hamad S. A., Grimison C., Higgins C. P., Mueller J. F., Kookana R. S., McLaughlin M. J.* Physical and chemical properties of carbon-based sorbents that affect the removal of per- and polyfluoroalkyl substances from solution and soil // *Science of The Total Environment*. 2023, vol. 875, no. 1, article 162653. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162653.
11. *Чебан А. Ю., Секисов Г. В., Хрунина Н. П., Соболев А. А., Угай С. М.* Перспективы развития Дальневосточного региона и экологические аспекты ведения горных работ // *Системы. Методы. Технологии*. — 2015. — № 3(27). — С. 156–161.
12. *Белецкая М. Г., Богданович Н. И.* Формирование адсорбционных свойств нанопористых материалов методом термохимической активации // *Химия растительного сырья*. — 2013. — № 3. — С. 77–82. DOI: 10.14258/jcprm.1303077.
13. *Манина Т. С., Федорова Н. И., Семенова С. А., Исмагилов З. Р.* Влияние условий щелочной обработки на свойства адсорбентов на основе природноокисленных углей Кузбасса // *Кокс и химия*. — 2013. — № 5. — С. 25–28. DOI: 10.3103/S1068364X13050037.
14. *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, vol. 48, no. 15, pp. 4556–4558. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.07.027.
15. *Козлов А. П., Зыков И. Ю., Дудникова Ю. Н., Цветков В. Э., Фёдорова Н. И., Исмагилов З. Р.* Переработка бурых углей в эффективные сорбенты для решения задач охраны окружающей среды и повышения качества жизни // *Вестник КузГТУ*. — 2018. — № 3. — С. 93–100. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-3-93-100.
16. *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*. 2003, vol. 41, pp. 267–275. DOI: 10.1016/S0008-6223(02)00279-8.
17. *Чесноков Н. В., Микова Н. М., Иванов И. П., Кузнецов Б. Н.* Получение углеродных сорбентов химической модификацией ископаемых углей и растительной биомассы // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. — 2014. — Т. 7. — № 1. — С. 42–53.
18. *Vorsina E. V., Moskalenko T. V., Mikheev V. A.* The generation of absorption qualities of lignite absorbents under conditions of alkali activation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 459, no. 5, article 052056. DOI: 10.1088/1755-1315/459/5/052056.
19. *Viswanathan B., Pulidindi I., Varadarajan T. K.* Methods of activation and specific applications of carbon materials. Indian Institute of Technology, Madras. 2009., 160 p.

20. Vorsina E., Moskalenko T., Mikheev V., Bilen M. Research of efficiency of lignite chemical modification and steam-gas activation combining for sorbents preparation // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 192, article 02025. DOI: 10.1051/e3sconf/202019202025. 

## REFERENCES

1. Ketabch M. R., Babamohammadi S., Davies W. G., Gorbounov M., Masoudi Soltani S. Latest advances and challenges in carbon capture using bio-based sorbents. A state-of-the-art review. *Carbon Capture Science & Technology*. 2023, vol. 6. DOI: 10.1016/j.ccst.2022.100087.
2. Kinle Kh., Bader E. *Aktivnyye ugli i ikh promyshlennoe primeneniye* [Active coals and their industrial application], Leningrad, Khimiya, 1984, 215 p.
3. Mukhin V. M., Klushin V. N. *Proizvodstvo i primeneniye uglerodnykh adsorbentov* [Production and use of carbon adsorbents], Moscow, Izd-vo RKhTU, 2012, 305 p.
4. Marsh H., Rodriguez-Reinoso F. *Activated Carbon*. Elsevier Science Technology Books, 2006, 536 p.
5. Kel'tsev H. B. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Fundamentals of adsorption technology], Moscow, Khimiya, 1984, 511 p.
6. Suliman M. A., Sajid M., Nazal M. K., Islam M. A. Carbon-based materials as promising sorbents for analytical sample preparation: Recent advances and trends in extraction of toxic metal pollutants from various media. *TrAC – Trends in Analytical Chemistry*. 2023, vol. 167, article 117265. DOI: 10.1016/j.trac.2023.117265.
7. Fenelonov V. B. *Vvedeniye v fizicheskuyu khimiyu formirovaniya supramolekulyarnoy struktury adsorbentov i katalizatorov* [Introduction to the physical chemistry of the formation of the supramolecular structure of adsorbents and catalysts], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2002, 414 p.
8. Jia J. B., Du H. H., Huang G. X., Liu Q. R., Xing B. L., Zhang C. X., Guo H. Y., Pan J. N. Research progress in non-energy utilization of lignite. *Xiandai Huagong. Modern Chemical Industry*. 2018, vol. 38, no. 6, pp. 24–27. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2018.06.006.
9. Zhao M.-H., Bai X., Fan X., Li Y., Liu Y., Huang J.-L., Mo W.-L., Wei X.-Y., Saikia B. K. Removal behaviors of phenol from aqueous solution using industrial coal sludge-derived porous carbon sorbent. *Journal of Molecular Liquids*. 2023, vol. 385, no. 1, article 1224271. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.122427.
10. Kabiri S., Navarro D. A., Hamad S. A., Grimison C., Higgins C. P., Mueller J. F., Kookana R. S., McLaughlin M. J. Physical and chemical properties of carbon-based sorbents that affect the removal of per- and polyfluoroalkyl substances from solution and soil. *Science of The Total Environment*. 2023, vol. 875, no. 1, article 162653. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162653.
11. Perspective for the development of the Far Eastern region and the environmental aspects of mining. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2015, no. 3(27), pp. 156–161. [In Russ].
12. Beletskaya M. G., Bogdanovich N. I. Formation of adsorption properties of nanoporous materials by thermochemical activation. *Chemistry of plant raw material*. 2013, no. 3, pp. 77–82. [In Russ]. DOI: 10.14258/jcprm.1303077.
13. Manina T. S., Fedorova N. I., Semenova S. A., Ismagilov Z. R. The influence of alkaline treatment conditions on the properties of adsorbents based on natural-oxidized Kuzbass coals. *Koks i himiya*. 2013, no. 5, pp. 25–28. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068364X13050037.
14. 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, vol. 48, no. 15, pp. 4556–4558. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.07.027.
15. Kozlov A. P., Zykov I. Yu., Dudnikova Yu. N., Tsvetkov V. E., Fedorova N. I., Ismagilov Z. R. Processing of brown coal into effective sorbents for solving problems of environmental protection and improving the quality of life. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018, no. 3, pp. 93–100. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-3-93-100.
16. 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*. 2003, vol. 41, pp. 267–275. DOI: 10.1016/S0008-6223(02)00279-8.
17. Chesnokov N. V., Mikova N. M., Ivanov I. P., Kuznecov B. N. Production of carbon sorbents by chemical modification of fossil coal and vegetable biomass. *Journal of Siberian Federal University: Chemistry*. 2014, vol. 7, no. 1, pp. 42–53. [In Russ].

18. Vorsina E. V., Moskalenko T. V., Mikheev V. A. The generation of absorption qualities of lignite absorbents under conditions of alkali activation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 459, no. 5, article 052056. DOI: 10.1088/1755-1315/459/5/052056.

19. Viswanathan B., Pulidindi I., Varadarajan T. K. *Methods of activation and specific applications of carbon materials*. Indian Institute of Technology, Madras. 2009., 160 p.

20. Vorsina E., Moskalenko T., Mikheev V., Bilen M. Research of efficiency of lignite chemical modification and steam-gas activation combining for sorbents preparation. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, article 02025. DOI: 10.1051/e3sconf/202019202025.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Ворсина Елена Владимировна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
доцент, старший научный сотрудник,  
e-mail: labkiy@mail.ru,

*Москаленко Татьяна Владимировна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник,  
ORCID ID: 0000-0003-2782-2488,

*Михеев Валерий Александрович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией,

<sup>1</sup> Федеральний исследовательский центр

«Якутский научный центр Сибирского отделения РАН»,  
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН,  
677018, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия.

**Для контактов:** Ворсина Е.В., e-mail: labkiy@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*E.V. Vorsina*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Assistant Professor, Senior Researcher,  
e-mail: labkiy@mail.ru,

*T.V. Moskalenko*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher,

ORCID ID: 0000-0003-2782-2488,

*V.A. Mikheev*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher, Head of Laboratory,

<sup>1</sup> Federal Research Center «Yakut Scientific Center

of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»,

N.V. Chersky Mining Institute of the North,

Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,

Yakutsk, Russia.

**Corresponding author:** E.V. Vorsina, e-mail: labkiy@mail.ru.

Получена редакцией 07.03.2024; получена после рецензии 13.05.2024; принята к печати 10.06.2024.

Received by the editors 07.03.2024; received after the review 13.05.2024; accepted for printing 10.06.2024.

