УДК 661.183.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4878
Шифр специальности ВАК: 1.3.14
Научная статья

Сравнение характеристик сорбентов из каменных углей марок Д, ДГ и Г

С.А. Шевырёв✉, С.С. Азиханов, А.Р. Богомолов, А.Б. Кузнецов

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Россия, г. Кемерово

✉ssa.pmahp@kuzstu.ru

Аннотация. ***Актуальность.*** В связи со снижением экспортного потенциала каменных углей существует устойчивый интерес угольных компаний к получению дополнительных продуктов из добываемого сырья. Диверсификация выпуска продукции может быть осуществлена за счет глубокой переработки ископаемого топлива и получения продуктов с повышенной добавленной стоимостью. Перспективным направлением в данном случае является производство сорбентов из энергетических, мало востребованных на рынке и других углей. ***Цель.*** Оценка перспектив получения сорбентов из каменных углей марок Д, ДГ и Г и расширение базы данных их характеристик. Представлены исследования сорбционной активности, удельной поверхности сорбентов и среднего диаметра пор. ***Методы.*** Исследования состояли в отработке двух подходов, условно обозначенных как одноступенчатая и двухступенчатая технология. При одноступенчатой технологии производилась непосредственная активация исходного материала перегретым водяным паром в кипящем слое при температуре 850 °С и атмосферном давлении. Двухступенчатая технология заключалась в предварительном частичном удалении летучих веществ из исходных материалов в муфельной печи, а затем в активации в перегретом водяном паре при температуре 850 °С и атмосферном давлении. ***Результаты и выводы.*** Для проведенных экспериментальных исследований создана база данных для исследованных материалов, которая содержит информацию по сорбционной активности, определенной по метиленовому голубому и йоду, удельной поверхности и среднему размеру пор. По результатам экспериментальных исследований установлено, что средний размер пор для исследованных материалов независимо от способа активации составил 2,2–2,4 нм. Сорбционная активность по метиленовому голубому в большинстве случаев составляет от 60 до 80 мг/г, по йоду – от 8 до 13 %.

Ключевые слова: каменный уголь, паровая активация, текстурные характеристики, удельная площадь поверхности, адсорбционная активность, сорбент

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2024-082/2 от 15.02.2024 г. (FZES-2024-0001).

Для цитирования: Сравнение характеристик сорбентов из каменных углей марок Д, ДГ и Г / С.А. Шевырёв, С.С. Азиханов, А.Р. Богомолов, А.Б. Кузнецов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 10. – С. 239–247. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4878

UDC 661.183.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4878
Scientific paper

Comparison of characteristics of sorbents from coal grades D, DG, and G

S.A. Shevyrev✉, S.S. Azikhanov, A.R. Bogomolov, A.B. Kuznetsov

Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

✉ssa.pmahp@kuzstu.ru

Abstract. ***Relevance.*** Due to a decrease in the export potential of coals, there is a steady interest of coal companies in obtaining additional products from the raw materials. Diversification of production can be achieved through deep processing of

fossil fuels and obtaining products with increased added value. In this case it is promising to produce sorbents from energy coals, which are in low demand on the market, and other coals. ***Aim.*** To assess the prospects for obtaining sorbents from coals of grades D (flame coals), DG (gas flame coals), and G (gas coals) and to expand the database of their characteristics. The sorption activity, specific surface area of sorbents and average pore diameter were studied. ***Methods.*** The research consisted of developing two approaches, conventionally designated as single-stage and two-stage technology. With single-stage technology, the source material was directly activated with superheated steam in a fluidized bed at 850°C and atmospheric pressure. The two-stage technology involved preliminary partial removal of volatile substances from the source materials in a muffle furnace, followed by activation in superheated steam at 850°C and atmospheric pressure. ***Results and conclusions.*** For the experimental studies, a database of materials under study was created; it contains information on the sorption activity determined by methylene blue and iodine, specific surface area, and average pore size. Based on the experimental investigations, it was found that the average pore size for the materials under study, regardless of the activation method, was 2.2–2.4 nm. The sorption activity by methylene blue in most cases ranges from 60 to 80 mg/g, and for iodine, it ranges from 8 to 13%.

Keywords: coal, steam activation, textural characteristics, specific surface area, adsorption activity, sorbent

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of project No. 075-03-2024-082/2 dated 02/15/2024 (FZES-2024-0001).

For citation: Shevyrev S.A., Azikhanov S.S., Bogomolov A.R., Kuznetsov A.B. Comparison of characteristics of sorbents from coal grades D, DG, and G. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 10, pp. 239–247. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4878

Введение

Процесс получения адсорбентов из различных материалов известен достаточно давно. В нем в качестве исходного сырья, как правило, используются либо древесные материалы [1], либо бурый уголь [2]. Применение данных материалов сложилось исторически, так как они характеризуются высоким содержанием летучих веществ. Другими материалами для производства адсорбентов могут быть, например, сельскохозяйственные культуры (кокосовые волокна и орехи [3]), отходы производства риса [4], водоросли [5] и другие материалы.

Традиционно получение сорбентов осуществляется по двухступенчатой методике. На первом этапе пиролиз [6], затем активация водяным паром либо CO_2 [7]. При этом процесс пиролиза кратко можно охарактеризовать как нагрев исходного материала без доступа окислителя в закрытом сосуде при температуре в реакторе в диапазоне 200–900 °С [8] (наиболее характерный диапазон). При этом в исследованиях процесса пиролиза важное значение отводят скорости нагрева исходного образца, например, медленный до 1–3 °С/мин (время примерно до 30 минут) и более быстрый – например, до 15 °С/мин и выше – до 400–500 °С/мин [9].

Далее в процессе паровой или углекислотной активации происходит дополнительное раскрытие пор и получается сорбент требуемого качества. Активация, как правило, требуется для образования кислородсодержащих функциональных групп повышающих сорбционную активность сорбентов. Такие функциональные группы – это фенольные (гидроксильные), карбонильные (хиноидные), карбоксильные, эфирные, лактонные.

Очень много исследований сосредоточено на активации поверхности углеродных материалов различными химическими веществами – щелочь (натриевая, калиевая), кислота (серная, ортофосфороная). Это одно из интересных направлений, которое развивают многие ученые, в том числе и в России. Целесообразность этого подхода состоит в получении очень высокой удельной поверхности (до 2000 $м^2/г$ и более) и большого объема пор, например, объем микропор до 1,6 $см^3/г$ [10].

Значительный интерес в производстве сорбентов для угледобывающих компаний Кузбасса обоснован необходимостью расширения линейки выпускаемой продукции. Одно из наиболее интересных направлений в данном случае состоит в получении сорбентов из углей разного качества и класса крупности, в том числе энергетических. Крупными промышленными потребителями заявлена потребность в создании промышленных установок получения сорбентов из каменных углей. Актуальность решения данного вопроса состоит в научном обосновании создания относительно простой и энергоэффективной технологии получения сорбентов из каменных углей различной степени метаморфизма с требуемыми текстурными характеристиками: удельной поверхностью, размером пор и их общим объемом. Сорбенты из каменных углей наравне с сорбентами из древесных материалов и бурых углей можно будет применить для различных технологических процессов. Так как уголь является одним из самых востребованных энергетических ресурсов в мире на сегодняшний день, то в получении разнообразных веществ из него заинтересованы различные компании.

Исследования получения сорбентов из каменного угля могут быть особо актуальны для угледобывающих компаний России также и потому, что в обозримой перспективе (примерно до 2040 г.) ожи-

даемое снижение потребления угля в мире [11] будет стимулировать исследовательские работы по направлению его нетопливного применения.

Цель настоящей работы состоит в расширении базы данных характеристик сорбентов, получаемых из Кузнецких каменных углей марок Д, ДГ и Г, и оценке перспектив их применения для промышленности.

Объекты и методика исследования

Для исследования перспектив получения сорбентов из каменных углей с определением их текстурных характеристик были использованы широко распространенные каменные угли марок Д, ДГ и Г. Исходные характеристики применяемых материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1. *Характеристики углей марок Д, ДГ, и Г Кузнецкого бассейна*

Table 1. *Characteristics of coals of grades D, DG, and G of the Kuznetsk basin*

Марка угля Coal grade	Элементный анализ Elemental analysis				Технический анализ Proximate analysis			Истинная плотность, кг/м³ True density, kg/m³
	%							
	C^d	H^d	N^d	S^d	A^d	W^a	V^d	
ДГ (DG)	70,18	4,79	2,04	0,26	12,07	4,67	31,37	1375,4
Д (D)	68,33	4,38	1,77	0,23	15,36	5,53	32,18	1361,6
Г (G)	75,22	5,13	1,8	1,2	5,8	4,77	39,99	1390,2

Элементный анализ выполнен с помощью анализатора Thermo Flash 2000 по адаптированным методикам [12, 13], технический анализ – по методикам [14–16], плотность углей в исходном состоянии – по методике [17].

Для проведения экспериментальных исследований использовали частицы угля размером от 3 до 4 мм, полученные после ситового разделения. Такие размеры частиц выбраны на основании данных, полученных от представителей промышленных предприятий Кемеровской области, как достаточно подходящие для дальнейшего практического применения.

Методология получения и исследования сорбентов состояла в проведении нескольких серий экспериментов. Получение сорбентов отрабатывали при одноступенчатом и двухступенчатом воздействии на исследуемый материал.

Одноступенчатая методика заключалась в паровой бескислородной газификации исходного материала в кипящем слое. Параметры проведения исследований соответствовали температуре водяного пара 850 °С (отклонение менее 15 °С) при небольшом избыточном давлении в газогенераторе и расходе газифицирующего агента около 100 дм^3/мин с возможным отклонением 5 %. Нестабильность подачи пара и температуры была обусловлена периодическим режимом работы парогенератора и незначительными пульсациями.

Паровую бескислородную газификацию проводили на экспериментальном стенде (рис. 1). Основным элементом стенда является вертикальный участок кипящего слоя. Формирование перегретого водяного пара заданной температуры осуществлялось путем смешения низкопотенциального (120–140 °С) пара из парогенератора и продуктов горения стехиометрической кислородно-водородной смеси. По окончании экспериментов оставшийся материал выгружали через разъемный фланец в верхней части рабочего участка.

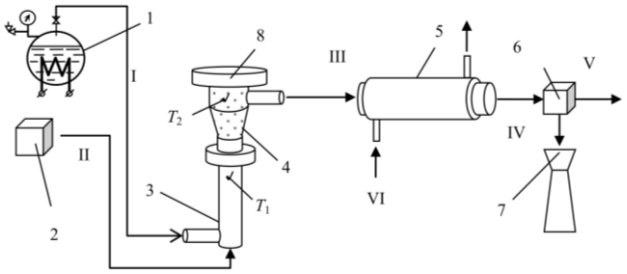

Рис. 1. *Схема экспериментального стенда для получения сорбентов: 1 – парогенератор; 2 – генератор горючей смеси; 3 – зона смешения рабочего участка; 4 – реакционная зона рабочего участка; 5 – конденсатор; 6 – емкость разделения; 7 – емкость сбора конденсата; 8 – разъемный фланец; I – низкотемпературный пар; II – кислородно-водородная смесь; III – парогазовая смесь; IV – конденсат; V – газообразные продукты; VI – охлаждающая вода*

Fig. 1. *Scheme of experimental setup for producing sorbents: 1 – steam generator; 2 – fuel mixture generator; 3 – mixing zone of the test section; 4 – reaction zone of the test section; 5 – condenser; 6 – separation tank; 7 – condensate collection tank; 8 – detachable flange; I – low-temperature steam; II – oxygen-hydrogen mixture; III – steam-gas mixture; IV – condensate; V – gaseous products; VI – cooling water*

Детальные характеристики экспериментального стенда, а также конструктивные особенности газогенератора представлены в [18, 19]. Исследуемая температура выбрана на основе ранее проведенного теоретического обоснования создания комплексов полигенерации с возможностью выработки перегретого водяного пара температурой до 1000 °С [20]. Для большего соответствия отрабатываемых методик практическому применению результатов исследований температура водяного пара была принята равной 850 °С.

Двухступенчатое воздействие на исследуемый материал состояло в предварительном частичном

удалении летучих веществ и последующей паровой бескислородной активации. Для этого исходный уголь помещали в лодочки с негерметичными крышками, которые переносили в муфельную печь и выдерживали в воздушной атмосфере в течение 3 мин при температуре 800 °C. По окончании процесса частичного удаления летучих веществ материал из лодочек высыпали в емкость с холодной водой и затем высушивали. Такой процесс имитирует частичное окисление исходного образца и служит для предварительного удаления летучих веществ и частичного исключения спекаемости углеродного остатка. Кроме этого, при таком способе термического воздействия ожидалось получение материалов с более развитой удельной площадью поверхности, которая формируется в процессе термической закалки [21]. Второй стадией двухступенчатого воздействия была паровая активация исходного материала после частичного удаления летучих веществ.

Углеродные сорбенты, получаемые из различных исходных материалов, в том числе из каменного угля, характеризуются несколькими основными параметрами. К основным можно отнести удельную поверхность $м^2/г$, сорбционную активность или поглотительную способность мг/г, размер пор, измеряемый, как правило, в нанометрах, а также объем пор $см^3/г$. Кроме этих параметров практический интерес для промышленного применения имеют такие характеристики, как истинная и насыпная плотность, механическая прочность на истирание и другие. Текстурные характеристики исследовали по методу BET при низкотемпературной адсорбции азота на автоматическом анализаторе удельной поверхности и пористости 3P Sync 200A. Детально методы исследования текстурных характеристик описаны в [22–24].

Сорбционную активность получаемых материалов при одноступенчатом и двухступенчатом воздействии анализировали по методике [25] при использовании метиленового голубого. Дополнительно выполнялись исследования по определению сорбционной активности по йоду по методике [26].

В процессе экспериментальных исследований по одноступенчатой и двухступенчатой методике проводились исследования с целью накопления большого массива статистических данных для последующей обработки и оценки применяемых подходов в получении сорбентов из каменных углей марок Д, ДГ и Г. На рис. 2–5 представлены результаты исследования зависимости сорбционной активности по йоду (X_I, %) и метиленовому голубому (X_M, %) от диаметра (D, нм) и объема пор (V_p, $см^3/г$) для отработанных методик – общие результаты по всем проведенным экспериментам. Обозначения на графиках: D, G и DG – сорбенты углей марок Д, Г и ДГ, полученные при одноступенчатой технологии, D_{carb}, G_{carb}, и DG_{carb} – сорбенты углей марок Д, Г и ДГ, полученные по двухступенчатой схеме. На рис. 2–5 красным цветом показаны обобщенные линии тренда по исследованным методикам и всем материалам без учета данных сорбента БАУ-А. Данные собственных измерений по сорбенту БАУ-А обозначены на рис. 2–5 как BAU-A.

Проведенные исследования показали относительно невысокую сорбционную активность по йоду независимо от способа получения сорбента. В большинстве случаев значения сорбционной активности по йоду находятся в диапазоне 8–13 %. Полученные результаты существенно уступают активности древесного угля марки БАУ-А и БАУ-МФ, для которых данный параметр регламентирован на уровне не менее 60 и 70 % соответственно [26].

Результаты исследования и их обсуждение

В зависимости от диаметра пор (рис. 2) получаемых сорбентов можно выделить наиболее часто встречающийся размер – около 2,2–2,3 нм. При этом сорбент DG_{carb} по емкости поглощения показывает результаты не ниже 9,0 %, так же, как и сорбент DG. Сорбент G_{carb} при термической обработке имеет мезопоры в узком диапазоне (2,5–2,75 нм), но показывает емкость поглощения в широком диапазоне – 6–15 %. Таким же образом с большим диапазоном сорбционной емкости при практически одинаковом размере пор 2,2–2,3 нм ведет себя полученный при одностадийной схеме сорбент G. Более стабильная сорбционная активность соответствует сорбенту D, для которого характерен узкий диапазон активности – от 7,5 до 12,5 %.

В целом общая тенденция по увеличению размера пор показывает незначительное снижение сорбционной активности по йоду. Среди исследованных материалов наиболее перспективными по показателю сорбционной активности по йоду являются угли марки Г и ДГ, активация которых происходила по одноступенчатой методике. Однако практическое применение этих марок углей может быть существенно ограничено. Это связано с заметной спекаемостью угля марки Г и чуть меньшей спекаемостью марки ДГ для углей исследованных месторождений. В результате опытов в газогенераторе для применяемых материалов наблюдалось образование отдельных агломератов, которые могут снижать общие показатели текстурных характеристик. В этом случае при практическом применении таких углей требуется разрушать их с получением заданного класса крупности и последующего грохочения, что может вести к образованию высокой доли штыба.

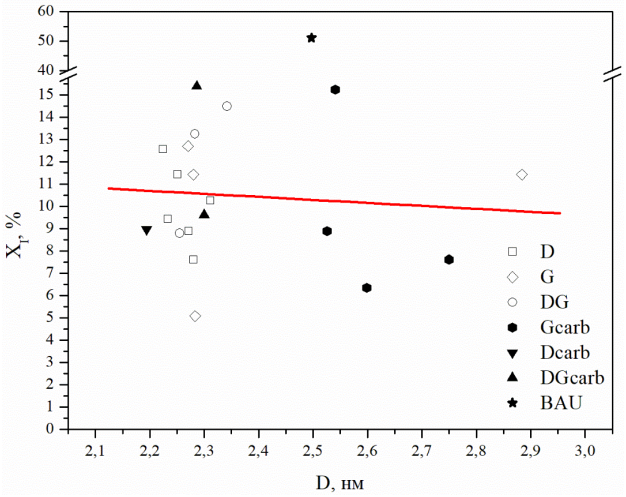

Рис. 2. *Зависимость сорбционной активности по йоду от среднего диаметра пор*
Fig. 2. *Dependence of sorption activity by iodine on average pore diameter*

Оценка влияния объема пор на сорбционную активность по йоду показана на рис. 3. При этом сорбент DG_{carb} по емкости поглощения показывает результаты не ниже 9,0 %, так же, как и сорбент DG в диапазоне объема пор от 0,09 до 0,15 $см^3/г$. Сорбент G_{carb} имеет узкий диапазон изменения объема пор (0,04–0,06 $см^3/г$), но широкий диапазон поглощающей способности (6,5–15,5 %). Сорбент D в диапазоне объема пор 0,15–0,19 показывает среднестатистическую ёмкость поглощение в пределах 10,5 %. Сорбент DG показывает удовлетворительные результаты по сорбционной емкости, т. е. выше 9 %. Более стабильно показывает результаты поглощающей способности сорбент D с увеличением объема пор.

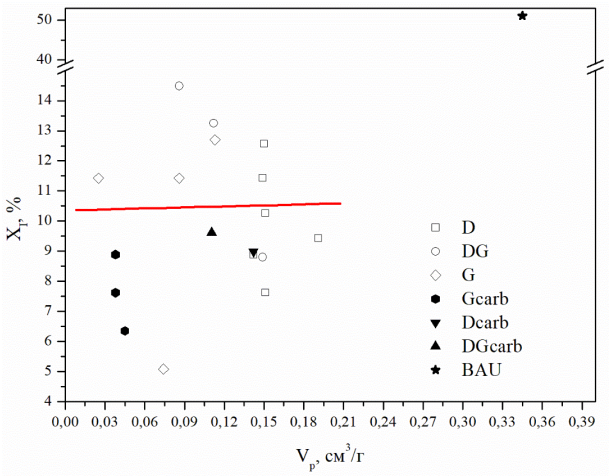

Рис. 3. *Зависимость сорбционной активности по йоду от объема пор*
Fig. 3. *Dependence of sorption activity by iodine on pore volume*

Общая тенденция для всех исследованных материалов и методов активации свидетельствует о незначительном повышении сорбционной активности по йоду при увеличении объема пор. В большинстве случаев сорбционная активность составляет около 8–13 %. Наиболее перспективными материалами по этому показателю также являются угли марок ДГ и Г.

На рис. 4, 5 показаны результаты исследования сорбционной активности по метиленовому голубому для различных исходных материалов и методик получения сорбентов.

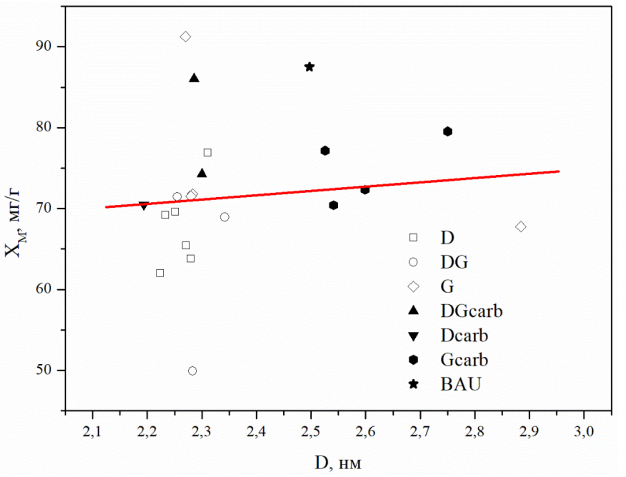

Рис. 4. *Зависимость сорбционной активности по метиленовому голубому от среднего диаметра пор*
Fig. 4. *Dependence of sorption activity by methylene blue on average pore diameter*

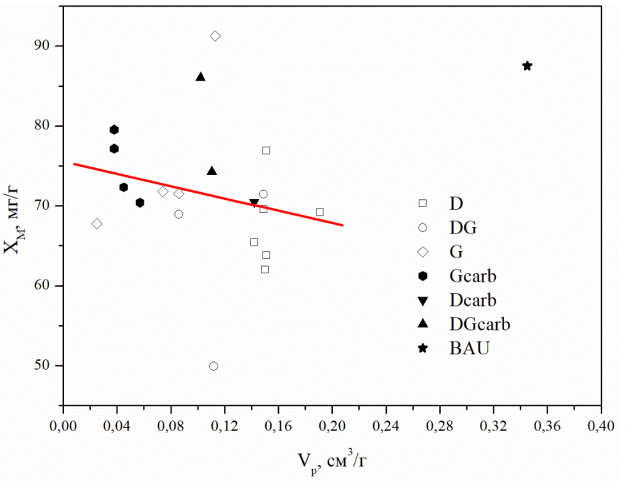

Рис. 5. *Зависимость сорбционной активности по метиленовому голубому от объема пор*
Fig. 5. *Dependence of sorption activity by methylene blue on pore volume*

В сравнении с йодом можно наблюдать противоположные тенденции к поглощению в зависимости от применяемых материалов и исследованных

методик обработки. При увеличении размера пор сорбционная активность по метиленовому голубому незначительно, но возрастает. Наиболее перспективным материалом по этому показателю являются угли марки ДГ и Г, подвергнутые двухступенчатой активации.

По зависимости сорбционной активности от объема пор можно отметить достаточно широкий разброс измеренных значений. Общая тенденция состоит в снижении сорбционной активности по метиленовому голубому при росте объема пор. При этом наиболее характерным значением сорбционной активности можно считать величину около 70–75 мг/г.

Ранее [27] проведены исследования по анализу состава минеральной массы углей марки Д и ДГ и выявлена связь сорбционной активности по метиленовому голубому с индексом основности золы. Для подтверждения этого предположения для угля марки Г также был определен элементный анализ золы, представленный в табл. 2.

Таблица 2. *Элементный анализ золы угля марки Г Кузнецкого бассейна*

Table. 2. *Elemental analysis of ash of «G» grade coal from the Kuznetsk Basin*

O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
47,35	1,49	1,16	13,9	25,08	0,18	0,65	2,5	2,59	0,84	4,26
	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3
	2	1,92	26,26	53,65	0,41	1,61	3,01	3,63	1,41	6,09

По приведённым данным индекс основности золы угля марки Г составляет:

$$I_{\Г} = \frac{Fe_2O_3+CaO+MgO+Na_2O+K_2O}{SiO_2+Al_2O_3+TiO_2} = 0,205.$$

Таким образом, для исследованных образцов углей марок Д, ДГ и Г индекс основности золы составляет соответственно: $I_{Д}$=0,366, $I_{ДГ}$=0,147, $I_{Г}$=0,205.

По результатам проведенных исследований связь сорбционной активности по метиленовому голубому с индексом основности золы хорошо видна на рис. 4, 5 для сорбентов, полученных по одноступенчатой методике. Для сорбентов, полученных по двухступенчатой методике, можно отметить обратную зависимость сорбционной активности от индекса основности золы: $X_{ДГ}>X_{Г}>X_{Д}$. Это связано не только с проявлением более основных свойств золы, а также с количеством этой золы в образце сорбента соответствующего материала. В отдельных опытах в процессе проведения экспериментальных исследований зольность исследованных углей могла как повышаться, так и понижаться [27]. Это происходило из-за различной интенсивности реагирования минеральной массы с водяным паром, а также частичным уносом материала из реакционного пространства газогенератора.

В качестве образца для сравнения полученных результатов сорбционной активности углей марок Д, ДГ и Г принят сорбент МИУ-С, промышленно применяемый в настоящее время в большой энергетике в значительном числе угледобывающих компаний, в том числе в Кузбассе. В основном такой сорбент служит для очистки воды от различных загрязнителей, например от хлоридов, сульфатов, соединений железа и других веществ. Результаты сорбционной активности МИУ-С и удельной поверхности представлены, например в [28]. Для проверки этих данных были проведены исследования по стандартным методикам, представленным выше. Результаты самостоятельного исследования сорбента МИУ-С показаны в табл. 3.

Таблица 3. *Характеристики сорбента МИУ-С*

Table 3. *Characteristics of MIU-S sorbent*

$X_м$, мг/г (mg/g)	X_I, %	s_{BET}, $м^2$/г (m^2/g)	D, нм (nm)	V_p, $см^3$/г (cm^3/g)
67	3,7	46,7	4,5	0,053

По удельной поверхности (s_{BET}) сорбенты из углей марок Д и ДГ существенно превосходят МИУ-С [27]. Для сорбента, полученного из угля марки Г удельная площадь изменяется в диапазоне от 34 до 199 $м^2$/г при среднем значении 96 $м^2$/г. По этому показателю, а также по сорбционной активности по йоду и общему объему пор сорбенты из углей исследованных марок значительно превосходят МИУ-С. По показателю сорбционной активности по метиленовому голубому сорбенты из углей марок Д, ДГ и Г сопоставимы с МИУ-С при чуть более высоких абсолютных значениях для исследованных углей.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что каменные угли марок Д, ДГ и Г являются перспективными материалами для получения сорбентов.

По текстурным характеристикам и сорбционной активности исследованные каменные угли марок Д, ДГ и Г могут успешно конкурировать с промышленно применяемыми сорбентами из бурых углей.

Средние значения сорбционной активности по йоду и метиленовому голубому для исследованных марок углей Д, ДГ и Г составляют от 60 до 80 мг/г, по йоду – от 8 до 13 % соответственно. Наиболее часто встречающийся размер пор для полученных сорбентов соответствует 2,2–2,4 нм при значительном диапазоне объема пор от 0,02 до 0,2 $см^3$/г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ultrasound-assisted and hydroalcoholic-freezing combination modification for the preparation of biomass sorbent from waste peach wood branches to efficient removal of methylene blue / T. Zhang, W. Wei, D. Sun, C. Zhou, H. Xu, M. Wu // Biomass Convers Biorefinery. –2024. – Vol. 14. – P. 13363–13376. DOI: 10.1007/s13399-022-03322-2
2. Adsorptive removal of dissolved Iron from groundwater by brown coal – A low-cost adsorbent / J.O. Quansah, F. Obiri-Nyarko, A.Y. Karikari // Journal of Contaminant Hydrology. – 2024. – Vol. 260. – P. 104283. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2023.104283
3. Tailored carbon adsorbents developed from coconut shells and coconut palm fibers for the removal of contaminants from anodizing wastewater / A.A. Acosta-Herrera, V. Hernández-Montoya, R. Tovar-Gómez, Ma. del R. Moreno-Virgen, M.A. Pérez-Cruz, M.A Montes-Morán, Francisco J. Cervantes // Journal of Molecular Liquids. – 2023. – Vol. 386. – P. 122471. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.122471
4. Facile synthesis of a porous sorbent derived from the rice husk biomass: a new and highly efficient material for water remediation / M. Hussain, M. Aadil, E.W. Cochran, S. Zulfiqar, W. Hassan, T. Kousar, H.H. Somaily, F. Mahmood // Inorganic Chemistry Communications. – 2024. – Vol. 160. – P. 112010. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.112010
5. A review on algae biosorption for the removal of hazardous pollutants from wastewater: Limiting factors, prospects and recommendations / B. Ramesh, A. Saravanan, P. Senthil Kumar, P.R. Yaashikaa, P. Thamarai, A. Shaji, G. Rangasamy // Environmental Pollution. – 2023. – Vol. 327. – P. 121572. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121572
6. Cost-effective sulfurized sorbents derived from one-step pyrolysis of wood and scrap tire for elemental mercury removal from flue gas / Y. Xu, G. Luo, Q. Zhang, Z. Li, S. Zhang, W. Cui // Fuel. – 2021. – Vol. 285. – P. 119221. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119221
7. Softwood and solid recovered fuel gasification residual chars as sorbents for flue gas mercury capture / J. Čespiva, M. Jadlovec, J. Výtisk, J. Serenčíšová, O. Tadeáš, S. Honus // Environmental Technology & Innovation. – 2023. – Vol. 29. – P. 102970. DOI: 10.1016/J.ETI.2022.102970
8. Binh Q.A., Nguyen V.H., Kajitvichyanukul P. Influence of pyrolysis conditions of modified corn cob bio-waste sorbents on adsorption mechanism of atrazine in contaminated water // Environmental Technology & Innovation. – 2022. – Vol. 26. – P. 102381. DOI: 10.1016/J.ETI.2022.102381
9. Mysore Prabhakara H., Bramer E.A., Brem G. Role of dolomite as an in-situ CO_2 sorbent and deoxygenation catalyst in fast pyrolysis of beechwood in a bench scale fluidized bed reactor // Fuel Processing Technology. – 2021. – Vol. 224. – P. 107029. DOI: 10.1016/J.FUPROC.2021.107029
10. Le Q.T.N., Hwang I. Stabilization of hydrophobic organic compounds in sediment using alkali-activated rice husk biochar: Enhancement of sorption by dissolved organic matter // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Vol. 476. – P. 146513. DOI: 10.1016/J.CEJ.2023.146513
11. China's zero-coal power system future / Y. Ren, G. Li, H. Wang, Z. Bie // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2024. – Vol. 156. – P. 109748. DOI: 10.1016/J.IJEPES.2023.109748
12. ASTM D5373-14e1. Standard test methods for determination of carbon, hydrogen and nitrogen in analysis samples of coal and carbon in analysis samples of coal and coke. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014. – 9 p.
13. ASTM D5291-10(2015). Standard test methods for instrumental determination of carbon, hydrogen, and nitrogen in petroleum products and lubricants. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015. – 8 p.
14. ГОСТ 33503-2015. Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе. – М.: Стандартинформ, 2016. – 7 с.
15. ГОСТ Р 55661-2013. Топливо твердое минеральное. Определение зольности. – М.: Стандартинформ, 2019. – 12 с.
16. ГОСТ Р 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.
17. ГОСТ 2160-2015. Топливо твердое минеральное. Определение действительной и кажущейся плотности. – М.: Стандартинформ, 2019. – 17 с.
18. Экспериментальное исследование процесса горения смесей водород–кислород и метан–кислород в среде слабоперегретого водяного пара / Н.А. Прибатурин, В.А. Федоров, М.В. Алексеев, А.Р. Богомолов, А.Л. Сорокин, С.С. Азиханов, С.А. Шевырев // Теплоэнергетика. – 2016. – № 5. – С. 31–36. DOI: 10.1134/S0040363616050088
19. Investigation of characteristics of gas and coke residue for the regime of quasi- and non-stationary steam gasification of coal in a fluidized bed: Part 1 / S.A. Shevyrev, N.E. Mazheiko, S.K. Yakutin, P.A. Strizhak // Energy. – 2022. – Vol. 50. – № 251. – P. 123938. DOI 10.1016/J.ENERGY.2022.123938
20. Паровая бескислородная газификация в условиях полигенерации / С.А. Шевырёв, П.А. Стрижак, Р.Ю. Дитрих, А.Р. Богомолов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 44–58. DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3042
21. Барченков В.В., Гайдуков И.В. Как восстановить сорбционные свойства активированного угля / Золотодобыча. – 2017. – № 221. URL: https://zolotodb.ru/article/11622 (дата обращения 29.10.2024).
22. Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications. 2nd ed. / F. Rouquerol, J. Rouquerol, K.S.W. Sing, P.L. Llewellyn. – Marseille: Academic Press, 2012. – 626 p.
23. Melgunov M.S., Ayupov A.B. Direct method for evaluation of BET adsorbed monolayer capacity // Microporus and Mesoporus Materials. – 2017. – Vol. 243. – P. 147–153. DOI: 10.1016/J.MICROMESO.2017.02.019
24. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes, A. Neimark, J.P. Olivier, K. Kaneko // Pure and Applied Chemistry. – 2015. – Vol. 87. – № 9–10. – P. 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117
25. ГОСТ 4453-74. Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 23 с.
26. ГОСТ 6217-74. Уголь активный древесный дробленый. Технические условия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 8 с.

27. Перспективы получения углеродных сорбентов из углей марок Д и ДГ / С.А. Шевырев, С.С. Азиханов, А.Р. Богомолов, А.Б. Кузнецов // Теплоэнергетика. – 2024. – № 3. – С. 63–71. DOI: 10.56304/S0040363624030081
28. Тарнопольская М.Г., Соловьева Е.А. Сравнение сорбента МИУ-С с различными активными углями с помощью экспресс-метода контроля метиленового голубого // Вода: химия и экология. – 2011. – № 3 (33). – С. 52–57.

Информация об авторах

Сергей Александрович Шевырёв, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, Институт энергетики, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, Весенняя ул., 28; ssa.pmahp@kuzstu.ru; https://orcid.org/0000-0003-0951-1600
Сергей Сейфудинович Азиханов, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, Институт энергетики, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, Весенняя ул., 28; ass.pmahp@kuzstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-3127-4384
Александр Романович Богомолов, доктор технических наук, заведующий кафедрой теплоэнергетики, Институт энергетики, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, Весенняя ул., 28; barom@kuzstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4746-0106
Артем Борисович Кузнецов, студент кафедры теплоэнергетики, Институт энергетики, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, Весенняя ул., 28; shpala_04@mail.ru

Поступила в редакцию: 28.10.2024
Поступила после рецензирования: 14.11.2024
Принята к публикации: 04.08.2025

References

1. Zhang T., Wei W., Sun D. Ultrasound-assisted and hydroalcoholic-freezing combination modification for the preparation of biomass sorbent from waste peach wood branches to efficient removal of methylene blue. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, vol. 14, pp. 13363–13376. DOI: 10.1007/s13399-022-03322-2
2. Quansah J.O., Obiri-Nyarko F., Karikari A.Y. Adsorptive removal of dissolved Iron from groundwater by brown coal – a low-cost adsorbent. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2024, vol. 260, pp. 104283. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2023.104283
3. Acosta-Herrera A.A., Hernández-Montoya V., Tovar-Gómez R., Del Moreno-Virgen M.R., Pérez-Cruz M.A., Montes-Morán M.Á., Cervantes Francisco J. Tailored carbon adsorbents developed from coconut shells and coconut palm fibers for the removal of contaminants from anodizing wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, vol. 386, pp. 122471. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.122471
4. Hussain M., Aadil M., Cochran E.W., Zulfiqar S., Hassan W., Kousar T., Somaily H.H., Mahmood F. Facile synthesis of a porous sorbent derived from the rice husk biomass: a new and highly efficient material for water remediation. *Inorganic Chemistry Communications*, 2024, vol. 160, pp. 112010. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.112010
5. Ramesh B., Saravanan A., Senthil Kumar P., Yaashikaa P.R., Thamarai P., Shaji A., Rangasamy G. A review on algae biosorption for the removal of hazardous pollutants from wastewater: limiting factors, prospects and recommendations. *Environmental Pollution*, 2023, vol. 327, pp. 121572. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121572
6. Xu Y., Luo G., Zhang Q., Li Z., Zhang S., Cui W. Cost-effective sulfurized sorbents derived from one-step pyrolysis of wood and scrap tire for elemental mercury removal from flue gas. *Fuel*, 2021, vol. 285, pp. 119221. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119221
7. Čespiva J., Jadlovec M., Výtisk J., Serenčíšová J., Tadeáš O., Honus S. Softwood and solid recovered fuel gasification residual chars as sorbents for flue gas mercury capture. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, vol. 29, pp. 102970. DOI: 10.1016/J.ETI.2022.102970
8. Binh Q.A., Nguyen V.H., Kajitvichyanukul P. Influence of pyrolysis conditions of modified corn cob bio-waste sorbents on adsorption mechanism of atrazine in contaminated water. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, vol. 26, pp. 102381. DOI: 10.1016/J.ETI.2022.102381
9. Mysore Prabhakara H., Bramer E.A., Brem G. Role of dolomite as an in-situ CO_2 sorbent and deoxygenation catalyst in fast pyrolysis of beechwood in a bench scale fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 2021, vol. 224, pp. 107029. DOI: 10.1016/J.FUPROC.2021.107029
10. Le Q.T.N., Hwang I. Stabilization of hydrophobic organic compounds in sediment using alkali-activated rice husk biochar: enhancement of sorption by dissolved organic matter. *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 476, pp. 146513. DOI: 10.1016/J.CEJ.2023.146513
11. Ren Y., Li G., Wang H., Bie Z. China's zero-coal power system future. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, vol. 156, pp. 109748. DOI: 10.1016/J.IJEPES.2023.109748
12. *ASTM D5373-14e1. Standard test methods for determination of carbon, hydrogen and nitrogen in analysis samples of coal and carbon in analysis samples of coal and coke*. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2014. 9 p.
13. *ASTM D5291-10(2015). Standard test methods for instrumental determination of carbon, hydrogen, and nitrogen in petroleum products and lubricants*. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2015. 8 p.
14. *SS 33503-2015. Solid mineral fuel. Methods for determination of moisture in the analysis sample*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 7 p. (In Russ.)
15. *SS R 55661-2013. Solid mineral fuel. Determination of ash*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 12 p. (In Russ.)
16. *SS R 55660-2013. Solid mineral fuel. Determination of volatile matter*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 16 p. (In Russ.)
17. *SS 2160-2015. Solid mineral fuel. Determination of true and apparent density*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 17 p. (In Russ.)

18. Pribaturin N.A., Alekseev M.V., Bogomolov A.R., Sorokin A.L., Azikhanov S.S., Shevyrev S.A. Experimental investigation on combustion of hydrogen–oxygen and methane–oxygen mixtures in the medium of low-superheated steam. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 5, pp. 336–341. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0040601516050086
19. Shevyrev S.A., Mazheiko N.E., Yakutin S.K., Strizhak P.A. Investigation of characteristics of gas and coke residue for the regime of quasi- and non-stationary steam gasification of coal in a fluidized bed: Part 1. *Energy*, 2022, no. 251, vol. 50, pp. 123938. DOI 10.1016/J.ENERGY.2022.123938
20. Shevyrev S.A., Strizhak P.A., Dietrich R.U., Bogomolov A.R. Oxygen-free steam gasification under polygeneration. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 44–58. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3042
21. Barchenkov V.V., Gaydukov I.V. How to restore the sorption properties of activated carbon. *Gold mining*, 2017, no. 221. (In Russ.) Available at: https://zolotodb.ru/article/11622 (accessed 29 October 2024).
22. Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K.S.W., Llewellyn P.L. *Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications*. 2nd ed. Marseille, Academic Press, 2012. 626 p.
23. Mel'gunov M.S., Ayupov A.B. Direct method for evaluation of BET adsorbed monolayer capacity. *Microporus and Mesoporus Materials*, 2017, vol. 243, pp. 147–153. DOI: 10.1016/J.MICROMESO.2017.02.019.
24. Thommes M., Kaneko K., Neimark A., Olivier J., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 2015, vol. 87, no. 9–10, pp. 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117
25. *SS 4453-74. Active adsorpting powder charcoal. Specifications*. Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 1993. 23 p. (In Russ.)
26. *SS 6217-74. Wood crushed activated carbon. Specification*. Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 2003. 8 p. (In Russ.)
27. Shevyrev S.A., Azikhanov S.S., Bogomolov A.R., Kuznetsov A.B. Prospects for obtaining carbon sorbents from D and DG Grade Coals. *Thermal Engineering*, 2024, no. 3, pp. 63–71. (In Russ.) DOI: 10.56304/S0040363624030081
28. Tarnopolskaya M.G., Solovyova E.A. Comparison of the MIU-S sorbent with various activated carbons using the express method of control of methylene blue. *Water: chemistry and ecology*, 2011, no. 3 (33), pp. 52–57. (In Russ.)

Information about the authors

Sergey A. Shevyrev, Cand. Sc., Associate Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; ssa.pmahp@kuzstu.ru; https://orcid.org/0000-0003-0951-1600
Sergey S. Azikhanov, Cand. Sc., Associate Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; ass.pmahp@kuzstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-3127-4384
Aleksandr R. Bogomolov, Dr. Sc., Head of the Thermal Power Engineering Department, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; barom@kuzstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4746-0106
Artem B. Kuznetsov, Student, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation. shpala_04@mail.ru

Received: 28.10.2024
Revised: 14.11.2024
Accepted: 04.08.2025