

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ ИЗ УГЛЕЙ МАРОК Д И ДГ¹

© 2024 г. С. А. Шевырёв^a, *, С. С. Азиханов^a, А. Р. Богомолов^a, А. Б. Кузнецов^a

^aКузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
Весенняя ул., д. 28, г. Кемерово, 650000 Россия

*e-mail: ssa.pmahp@kuzstu.ru

Поступила в редакцию 23.07.2023 г.

После доработки 28.08.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

Промышленное получение углеродных сорбентов из углей является перспективным и актуальным направлением. В качестве исходного материала используется главным образом бурый уголь, который характеризуется высоким выходом летучих веществ и низкой зольностью. Определенный интерес для угольной промышленности представляет разработка технологии получения сорбентов из каменных углей низкой степени метаморфизма с большой удельной площадью поверхности, высокой адсорбционной активностью и низкой стоимостью. Существующие методики получения сорбентов из углей, соответствующих таким критериям, должны базироваться на различных теплофизических принципах воздействия на исходный материал. В работе исследовались одноступенчатая и двухступенчатая методики получения сорбентов из каменных углей марок Д и ДГ, добываемых в Кузбассе. Одноступенчатая методика заключалась в паровой газификации исходного материала в кипящем слое. Двухступенчатая методика базировалась на предварительной декарбонизации в мuffleной печи с последующей активацией перегретым водяным паром в кипящем слое. В результате экспериментальных исследований получены образцы углеродных сорбентов из каменных углей низкой степени метаморфизма. Анализ текстурных характеристик показал, что удельная площадь поверхности сорбентов составляет до 250 м²/г, адсорбционная активность – до 100 мг/г. Установлено, что состав минеральной массы исходных углей существенно влияет на адсорбционную активность получаемых сорбентов. Оценки показывают, что чем выше индекс основности золы, тем более высокой адсорбционной активностью обладает получаемый углеродный сорбент. При одноступенчатой методике получения сорбентов из каменного угля марок Д и ДГ в кипящем слое достигается довольно высокая удельная площадь поверхности при относительно низкой адсорбционной активности в сравнении с двухступенчатой методикой.

Ключевые слова: энергетический уголь, паровая газификация, текстурные характеристики, удельная площадь поверхности, адсорбционная активность, сорбент, минеральная масса, индекс основности золы

DOI: 10.56304/S0040363624030081

Несмотря на развитие альтернативных источников энергии [1], в валовой выработке электроэнергии по первичным энергоносителям в мире по-прежнему доминируют электростанции, на которых используется уголь [2], широко применяемый и для других целей, например для производства сорбентов. В России альтернативное использование угля особенно актуально в регионах с достаточно развитой угольной промышленностью, к которым, в частности, относится Кузбасс. Снижение спроса на твердое топливо при работе

угольных электростанций России может негативно сказаться на социально-экономическом развитии регионов [3]. Сохранение добычи и переработки твердого топлива возможно при условии освоения новых и нетрадиционных технологических методов его использования.

Современные исследования глубокой переработки твердого топлива ведутся по нескольким направлениям: пиролиз [4], газификация [5], ожигение [6], получение сорбентов и др. Некоторые из технологических подходов используются на практике при промышленном производстве продукции, однако большинство исследований сосредоточено на фундаментальных научных вопросах. Например, в [7] рассматривается получение углеродных сорбентов с очень высокой

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным соглашением № 075-03-2021-138/3 о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).

Таблица 1. Характеристики углей марок ДГ и Д Кузнецкого бассейна России

Марка угля	Элементный анализ, %				Технический анализ, %			Истинная плотность, кг/м ³
	C ^d	H ^d	N ^d	S ^d	A ^d	W ^a	V ^d	
ДГ	70.18	4.79	2.04	0.26	12.07	4.67	31.37	1375.4
Д	68.33	4.38	1.77	0.23	15.36	5.53	32.18	1361.6

Примечание. C^d, H^d, N^d, S^d – содержание углерода, водорода, азота и серы в пересчете на сухое состояние; A^d – зольность в пересчете на сухое состояние; W^a – влажность топлива; V^d – выход летучих веществ в пересчете на сухое состояние.

удельной площадью поверхности при использовании щелочи.

Промышленный опыт реализации технологии глубокой переработки твердого топлива представлен в работе [8], в которой основное внимание сосредоточено на получении твердого углеродного остатка. Области применения такого рода углеродного материала могут быть различными в зависимости от технологических условий. Перспективным направлением является получение углеродного сорбента [8]. Ключевая особенность его реализации заключается в использовании бурого угля, характеризующегося высоким содержанием летучих веществ и низкой зольностью. Однако для предприятий угольной отрасли существует потребность получения углеродных сорбентов из каменных углей. Исходя из различных научных методик, представленных в [7, 9], можно отметить, что перспективными для получения сорбентов из каменных углей могут быть теплофизические методы, причем при минимальных затратах энергии. Для их реализации необходимо отработать различные способы термического воздействия и оценить текстурные характеристики получаемых материалов. Так как практический опыт производства сорбентов из бурых углей свидетельствует об их приемлемых для промышленного применения характеристиках, то целесообразно исследовать каменные угли низкой степени метаморфизма с относительно высоким содержанием летучих веществ.

Цель данной работы состоит в исследовании текстурных характеристик углеродных сорбентов, полученных из каменных углей энергетических марок Д и ДГ при различных способах термического воздействия, для оценки возможности их практического применения.

МЕТОДОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ СОРБЕНТОВ

Для исследования технологии получения углеродных сорбентов из каменных углей марок Д и ДГ были отобраны образцы углей Кузнецкого бассейна, характеристики которых представлены в табл. 1. Элементный анализ выполнен с помощью анализатора Thermo Flash 2000 по адаптированным методикам [10, 11], технический анализ –

в соответствии с ГОСТ [12–14], плотность углей в исходном состоянии определена согласно [15].

Для проведения экспериментальных исследований использовали частицы угля размером от 1.5 до 2.0 мм, полученные после ситового разделения. Такие размеры частиц выбраны на основании данных, представленных в [8], а также как достаточно близкие к тем, что применяются на практике.

Для получения и исследования сорбентов выполняли несколько серий экспериментов 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°C (отклонение менее 15°C) при небольшом избыточном давлении в газогенераторе и расходе газифицирующего агента около 100 дм³/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, в котором протекает процесс паровой активации. Формирование перегретого водяного пара заданной температуры осуществлялось путем смешения низкопотенциального (120–140°C) пара из парогенератора и продуктов горения стехиометрической кислородно-водородной смеси. По окончании экспериментов оставшийся материал выгружали через разъемный фланец в верхней части рабочего участка.

Характеристики экспериментального стенда, а также конструктивные особенности газогенератора представлены в [16, 17]. Температура была выбрана на основе выполненного ранее теоретического обоснования создания комплексов полигенерации с возможностью выработки перегретого водяного пара температурой до 1000°C [18]. Для большего соответствия обрабатываемых методик практическому применению результатов исследований температура водяного пара была принята равной 850°C.

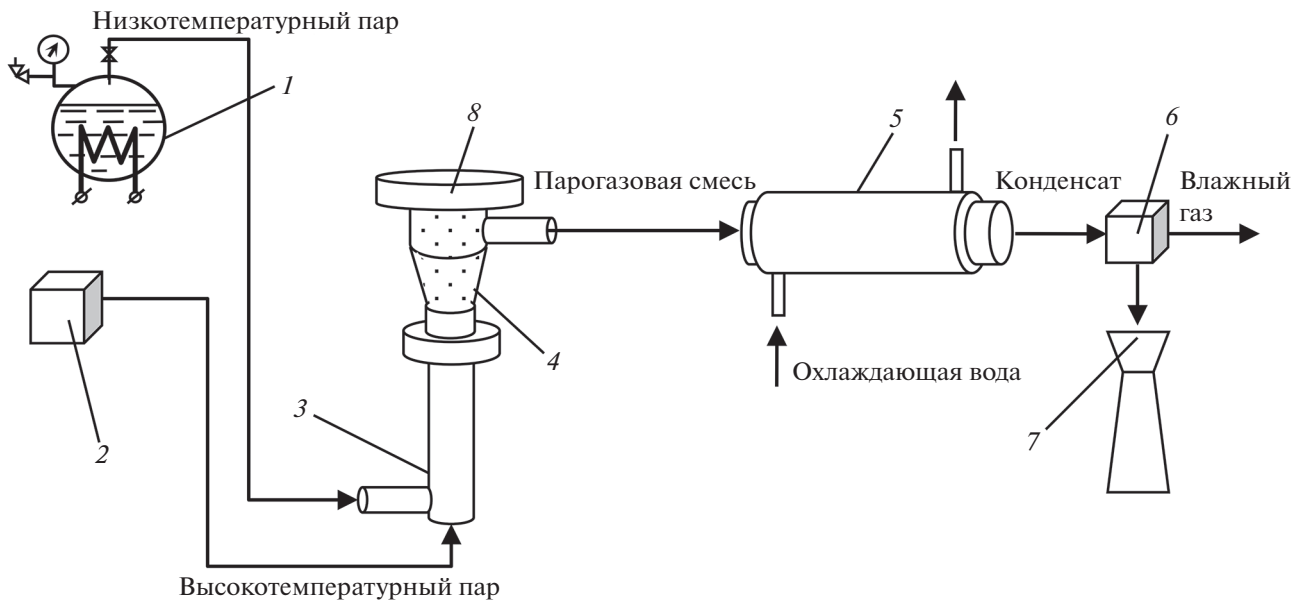


Рис. 1. Упрощенная схема экспериментального стенда.

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

Двухступенчатое воздействие на исследуемый материал заключалось в предварительной декарбонизации и последующей паровой бескислородной газификации. Для этого исходный уголь помещали в формы в виде лодочек с негерметичными крышками, которые переносили в муфельную печь и выдерживали в воздушной атмосфере в течение 3 мин при температуре 600, 800 или 1000°С. По окончании процесса декарбонизации 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 недопущения спекаемости углеродного остатка. Ожидалось, что при таком способе термического воздействия будут получены материалы с более развитой удельной площадью поверхности, которая формируется в процессе термической заковки [19]. Второй стадией двухступенчатого воздействия была паровая газификация декарбонизованного материала, после которой получался окончательный продукт. Его текстурные характеристики исследовали по методу ВЕТ (Brunauer–Emmett–Teller) при низкотемпературной адсорбции азота на автоматическом анализаторе поверхности и пористости 3P Sync 200А. Детально методы исследования текстурных характеристик описаны в [20–22].

Сорбционную активность материалов, получаемых при одноступенчатом и двухступенчатом воздействии, определяли по методике [23] при использовании метиленового голубого.

Морфологию частиц и текстуру поверхности исследовали с помощью электронно-микроско-

пических изображений во вторичных электронах (контраст, зависящий от топографии поверхности) при различных увеличениях.

Дисперсный состав и распределение минеральных компонентов в образцах изображения определяли в отраженных электронах (контраст, зависящий от химического состава поверхности).

Исследование химического состава (полуколичественный анализ) и картирование химических элементов проводили в режиме регистрации рентгеновского характеристического излучения с помощью энергодисперсионного детектора (разрешающая способность 133 эВ, предел обнаружения химических элементов 0.01% массы) при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда (электронного пучка) 1 нА. Содержание каждого элемента в анализируемой пробе рассчитывали по полученным спектрам с помощью программного обеспечения Analysis Station версии 3.62.07 компании JEOL Engineering с использованием нестандартного метода ZAF. Качественный и полуколичественный анализы содержания химических элементов выполняли на аналитических пробах образца (проба, измельченная до прохождения через сито с отверстиями номинальным размером 212 мкм в соответствии с [24]).

Систематические погрешности и повторяемость результатов проведения экспериментальных исследований определяли с учетом множественного повторения отдельных опытов. Было установлено, что при одноступенчатой обработке материала погрешность составляла менее 5%, при двухступенчатой – 5%, при исследовании сорбционной активности – менее 4%.

Таблица 2. Текстульные характеристики исходных материалов и карбонизата

Образец	t , °С	$s_{\text{ВЕТ}}$, м ² /г	V , см ³ /г	d , нм
Уголь ДГ	—	3.3	0.009	11.036
Карбонизат ДГ	600	1.3	0.004	13.316
	800	85.4	0.050	2.327
	1000	13.6	0.022	6.403
Уголь Д	—	3.9	0.011	11.210
Карбонизат Д	600	1.6	0.006	16.054
	800	124.7	0.075	2.389
	1000	25.0	0.020	3.249

Примечание. t – температура; $s_{\text{ВЕТ}}$ – удельная площадь поверхности; V – объем пор; d – средний размер пор.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате проведения экспериментальных исследований были определены текстульные характеристики исходного материала и получаемого карбонизата (табл. 2).

В процессе подготовки карбонизата была выявлена значительная разница в характеристиках получаемого продукта. Уголь марки ДГ при декарбонизации существенно спекался. Причем при высокой температуре в печи внешняя поверхность частиц практически не имела пор (рис. 2). Чтобы провести последующие экспериментальные исследования при паровой активации, агломерат приходилось механически разрушать и повторно выполнять рассев для получения частиц исходного размера.

Уголь марки Д при декарбонизации не спекался, и частицы сохраняли свой первоначальный размер. Поэтому для дальнейших экспериментов использовали частицы без дополнительного отсева. Переменная температура декарбонизации свидетельствует о том, что при более высокой

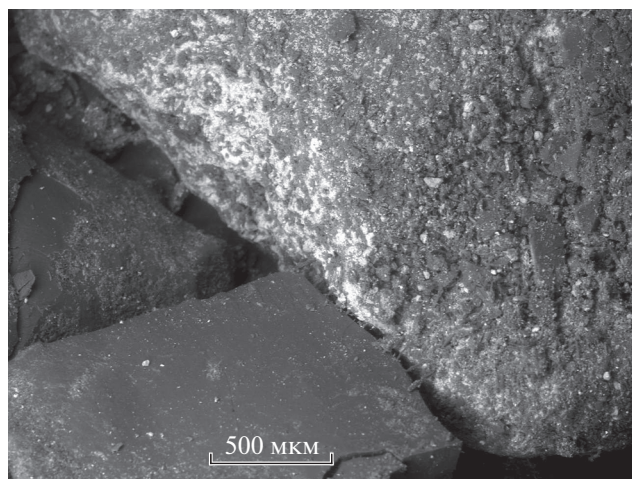


Рис. 2. Поверхность частицы угля марки ДГ после декарбонизации в печи при температуре 1000°С

температуре обработки в печи более высокая удельная площадь поверхности частицы не достигается.

В процессе экспериментальных исследований полученные результаты сопоставляли по таким параметрам, как вид исследуемого материала, способ его подготовки и время воздействия на него. Во всех экспериментах по одноступенчатой и двухступенчатой методикам масса используемого материала составляла 4 г. Время паровой активации исследуемых материалов составляло от 3 до 20 мин. Нижняя граница принята в результате теоретической оценки времени прогрева частицы до температуры водяного пара, поступающего в газогенератор, верхняя граница – исходя из необходимости получения углеродного сорбента с приемлемой зольностью. Кроме того, большее время проведения экспериментов способствует реализации паровой газификации вместо паровой активации, целью которой является раскрытие пор.

По результатам серии экспериментов для одноступенчатой методики получена зависимость удельной площади поверхности частиц угля от времени паровой газификации (рис. 3). Приведенные на рисунке данные свидетельствуют о более высокой удельной площади поверхности угля марки Д для всего временного диапазона исследования. Это достигается прежде всего вследствие того, что исходный материал не спекается, что позволяет создать в газогенераторе устойчивый кипящий слой.

Оптимальное время проведения исследований составляет 15 мин. При этом образуется материал с наибольшей удельной площадью поверхности, превышающей таковую для других исследованных материалов примерно на 20%. При нижней временной границе исследований (до 5 мин) можно получить частицы, удельная площадь поверхности которых больше, чем при декарбонизации в печи. Таким образом, можно утверждать, что двухступенчатая переработка не всегда необходима и целесообразна. Главное назначение процесса декарбонизации – получение материала

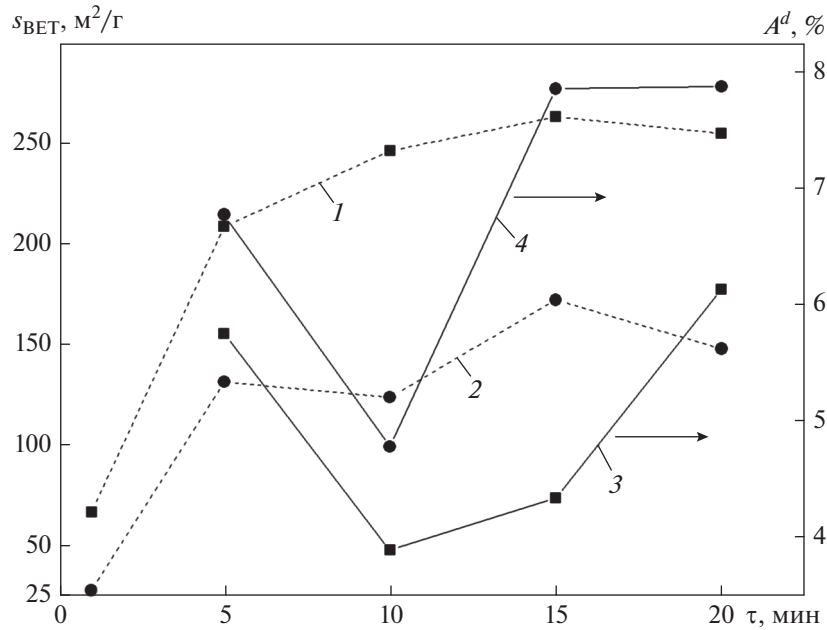


Рис. 3. Зависимость удельной площади поверхности $s_{ВЕТ}$ угля марки Д (1), ДГ (2) и зольности A^d угля марки Д (3), ДГ (4) от времени обработки τ по одноступенчатой методике

лов, которые при паровой активации не будут спекаться в газогенераторе. Именно об этом свидетельствуют результаты исследований угля марки ДГ. Кроме того, предварительная декарбонизация может быть использована для последующего снижения времени паровой активации при реализации двухступенчатой методики.

Зависимость удельной площади поверхности частиц карбонизата от времени проведения экспериментов по двухступенчатой методике показана на рис. 4, зависимость зольности — на рис. 5.

На рис. 4 видно, что минимальное время обработки материалов может быть более выгодно: снижаются общие энергозатраты и расход водяного пара. При обработке угля марки ДГ по двухступенчатой методике удельная площадь поверхности частиц уменьшается в сравнении с одноступенчатой методикой приблизительно на 30 м²/г, или примерно на 20% (для 15 мин), угля марки Д — максимум на 20 м²/г, или примерно на 8% максимального значения. Увеличение времени проведения второй стадии при двухступенчатой обработке в большинстве случаев не приводит к повышению удельной площади поверхности, что свидетельствует о нецелесообразности длительной выдержки материала.

Незначительное увеличение удельной площади поверхности наблюдается для угля марки ДГ после декарбонизации при 1000°С. Это может быть связано с тем, что при паровой активации несколько уменьшается размер частиц при раскрытии пор. Однако даже увеличение времени паровой активации для угля марки ДГ может быть

нецелесообразно ввиду общей низкой удельной площади поверхности частиц, спекающихся на первой стадии двухступенчатой обработки.

Данные по адсорбционной активности материалов после их обработки представлены в табл. 3. Согласно результатам исследований обработанный по одноступенчатой методике уголь марки ДГ является более предпочтительным материалом по сравнению с углем марки Д, особенно если время обработки было минимальным. При обработке углей по двухступенчатой методике адсорбционная активность полученных материалов зависела от марки исходного угля и времени обработки в муфельной печи. Объяснить это можно, проанализировав данные по составу минеральной части образующихся в процессе газификации углеродных остатков (табл. 4).

Метиленовый синий относится к группе катионных красителей [25–27]. При его применении в водном растворе формируются положительно заряженные ионы. Следовательно, максимальное реагирование его с исходным материалом будет наблюдаться при наличии большего количества анионов. Согласно результатам анализа минеральной массы углеродных остатков в соответствии с [28] можно определить индекс основности I золы по следующей формуле:

$$I = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2},$$

где в числителе и знаменателе — массы основных и кислых оксидов соответственно.

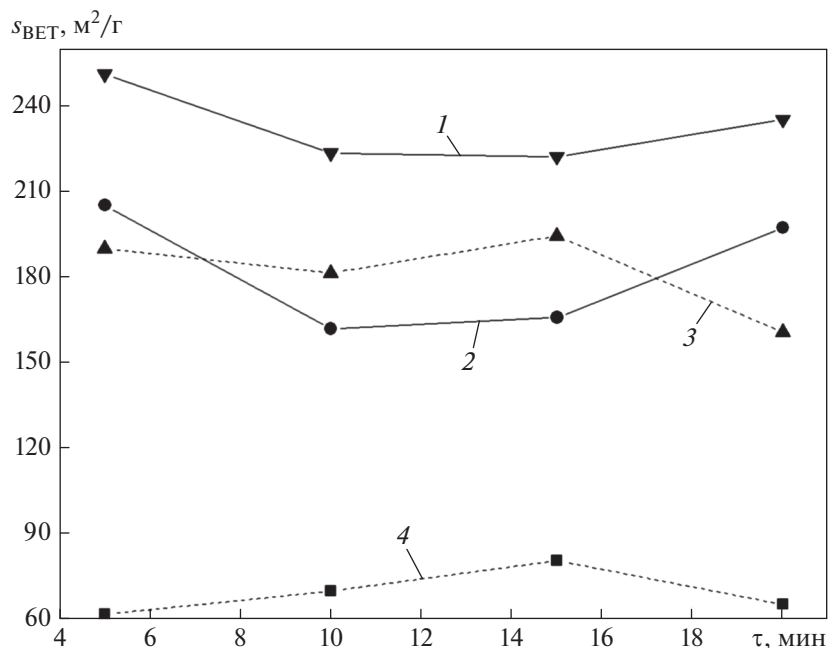


Рис. 4. Зависимость удельной площади поверхности частиц карбонизата, полученного из угля марки Д (1, 2), ДГ (3, 4), от времени его обработки по двухступенчатой методике при температуре 800°C (1, 3) и 1000°C (2, 4)

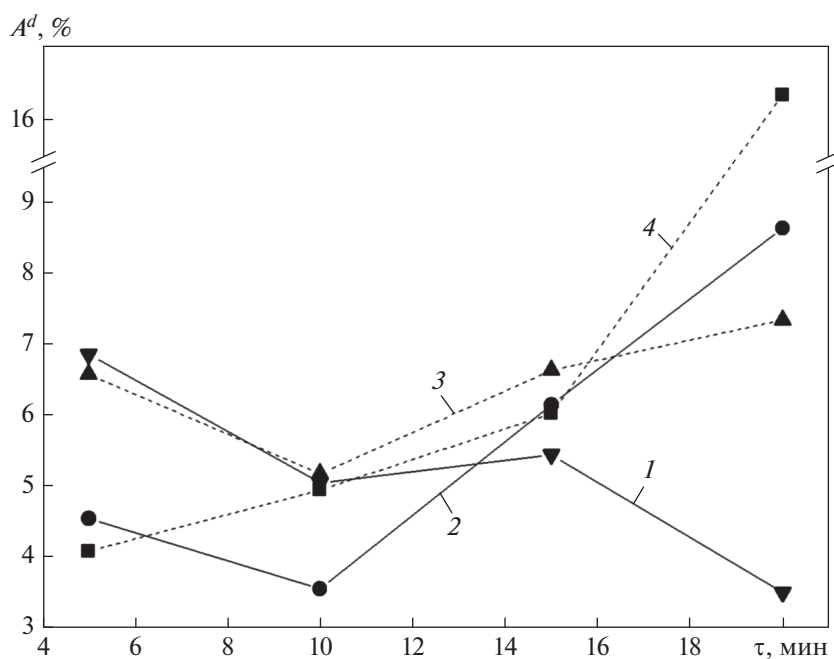


Рис. 5. Зависимость зольности карбонизата, полученного из угля марки Д (1, 2), ДГ (3, 4), от времени его обработки по двухступенчатой методике при температуре 800°C (1, 3) и 1000°C (2, 4) с последующей газификацией при 850°C

Индекс основности часто применяется для оценки плавления золы. В данном случае его можно рассматривать как показатель, характеризующий склонность к формированию основных или кислотных свойств водных растворов углеродного материала. Индекс основности золы угля марки Д равен 0.366, угля марки ДГ – 0.147. Для

углеродного остатка угля марки Д характерны почти в 2.2 раза более высокие основные свойства, чем для углеродного остатка угля марки ДГ. Следовательно, при диссоциации в водной среде уголь марки Д будет формировать больше отрицательно заряженных гидроксильных групп, способных взаимодействовать с метиленовым синим. Такие

Таблица 3. Адсорбционная активность углей, мг/г, после их обработки по одноступенчатой и двухступенчатой методикам

Марка угля	Одноступенчатая методика				Двухступенчатая методика при температуре 800/1000°C			
	Время эксперимента, мин							
	5	10	15	20	5	10	15	20
Д	45.23	55.51	61.45	67.45	70.12/74.63	74.36/99.40	72.40/81.40	86.97/86.93
ДГ	55.76	61.62	73.99	74.02	51.64/60.84	92.40/80.10	81.20/71.90	72.76/90.01

Таблица 4. Масса, %, элемента и вещества, содержащихся в углеродных остатках углей, обработанных по двухступенчатой методике при газификации в течение 10 мин и выдержке в печи при температуре 1000°C

Элемент	Марка угля		Вещество	Марка угля	
	Д	ДГ		Д	ДГ
О	46.18	47.95	Na ₂ O	1.78	1.20
Na	1.32	0.94	MgO	3.58	29.05
Mg	2.16	0.73	Al ₂ O ₃	26.28	52.27
Al	13.91	15.37	SiO ₂	39.39	1.77
Si	18.41	24.44	P ₂ O ₅	1.99	1.14
P	0.87	0.77	SO ₃	6.22	1.46
S	2.49	0.46	K ₂ O	1.34	2.63
K	1.11	1.21	CaO	7.64	1.88
Ca	5.46	1.88	TiO ₂	1.55	7.32
Ti	0.93	1.13	Fe ₂ O ₃	10.23	1.27
Fe	7.16	5.12	—	—	—

свойства углеродного остатка исследованных углей при различных способах подготовки в совокупности с остаточной зольностью обеспечивают большую адсорбционную активность (см. табл. 3).

ВЫВОДЫ

1. Каменные угли низкой степени метаморфизма марок Д и ДГ могут быть использованы в качестве исходного сырья для промышленного производства углеродных сорбентов с относительно высокой удельной площадью поверхности (до 250 м²/г) и адсорбционной активностью (до 100 мг/г).

2. Проведение двухступенчатой подготовки угля, характеризующегося высоким выходом летучих веществ и склонностью к спеканию, позволяет получить сорбент с относительно хорошими текстурными показателями.

3. При непосредственной паровой газификации угля низкой степени метаморфизма марок Д и ДГ в кипящем слое образуется сорбент с довольно большой удельной площадью поверхности, имеющий невысокую адсорбционную актив-

ность в отличие от материала, полученного по двухступенчатой методике, адсорбционная активность которого может быть до 2 раз выше.

4. На адсорбционную активность сорбентов, полученных из каменных углей, существенно влияет состав минеральной массы исходного материала. Чем выше в исходном угле индекс основности золы, тем больше его адсорбционная способность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Некрасов С.А. Снижение издержек на интеграцию возобновляемых источников электроэнергии в энергосистему — путь повышения доступности возобновляемой энергетики // Теплоэнергетика. 2021. № 8. С. 5–16. <https://doi.org/10.1134/S0040363621070031>
2. Тугов А.Н., Артемьева И.В. Производство электроэнергии в мире: тенденции и достигнутые в 2021 г. результаты // Электрические станции. 2022. № 11. С. 2–11. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.1096.11.001>

3. **Кузбасс:** новая парадигма развития / Ю.А. Фридман, Г.Н. Речко, Е.Ю. Логинова, Э.В. Алексеенко, Д.В. Крицкий // ЭКО. 2015. № 9 (495). С. 110–122.
4. **Исследование** термических свойств нефтяного кокса в процессе получения активированных углей / Е.А. Фарберова, Е.А. Першин, А.С. Максимов, Н.Б. Ходяшев, С.А. Смирнов, К.Г. Кузьминых // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2023. Т. 66. № 6. С. 102–110. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236606.6776>
5. **Шевырев С.А.** Применение Aspen plus для моделирования состава синтез-газа в процессе паровой бескислородной газификации биомассы // Теплоэнергетика. 2021. № 9. С. 43–50. <https://doi.org/10.1134/S0040363621080099>
6. **Ушаков К.Ю., Петров И.Я., Богомолов А.Р.** Исследование термических превращений низкометаморфизованных кузбасских углей в различных средах и прогнозирование их гидрируемости в процессах прямого ожигения // Химия твердого топлива. 2021. № 4. С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S0023117721040083>
7. **Текстурные** характеристики углеродных сорбентов из каменных углей различных стадий метаморфизма / И.Ю. Зыков, А.А. Звекон, Ю.Н. Дудникова, Н.И. Федорова, З.Р. Исмагилов // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. 2019. № 4 (134). С. 64–69. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2019-4-64-69>
8. **Получение** сорбента из низкочольного бурого угля / Д.А. Логинов, С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, В.Н. Кочетков // Химия твердого топлива. 2016. № 2. С. 46–50. <https://doi.org/10.7868/S0023117716020055>
9. **Получение** активированного угля с использованием оборудования ТЭС и котельных / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, Т.А. Акбаев, В.И. Богаткин // Теплоэнергетика. 2013. № 8. С. 57–64. <https://doi.org/10.1134/S0040363613070084>
10. **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. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
11. **ASTM D5291-10(2015).** Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Petroleum Products and Lubricants. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
12. **ГОСТ Р 52917-2008. ISO 11722:1999.** Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе. М.: Стандартинформ, 2008.
13. **ГОСТ Р 55661-2013. ISO 1171:2010.** Твердое минеральное топливо. Определение зольности. М.: Стандартинформ, 2019.
14. **ГОСТ Р 55660-2013. ISO 562:2010.** Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. М.: Стандартинформ, 2013.
15. **ГОСТ 2160-2015. ISO 5072:2013.** Топливо твердое минеральное. Определение действительной и кажущейся плотности. М.: Стандартинформ, 2016.
16. **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. <https://doi.org/10.1134/S0040363616050088>
17. **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. No. 251 (50). P. 123938. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123938>
18. **Паровая** бескислородная газификация в условиях полигенерации / С.А. Шевырёв, П.А. Стрижак, Р.Ю. Дитрих, А.Р. Богомолов // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 2. С. 44–58. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3042>
19. **Барченков В.В.** Как восстановить сорбционные свойства активированного угля // Золотодобыча. 2017. № 221. С. 5–10.
20. **Adsorption** by powders and porous solids. / F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. S.W. Sing, P.L. Llewellyn. 2nd ed. Elsevier Collection, 2014.
21. **Mel'gunov M.S., Ayupov A.B.** Direct method for evaluation of BET adsorbed monolayer capacity // Microporous Mesoporous Materials. 2017. V. 243. P. 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.02.019>
22. **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 App. Chem. 2015. V. 87. No. 9–10. P. 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
23. **ГОСТ 4453-74.** Уголь активный осветляющий древесный порошокобразный. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1974.
24. **ГОСТ Р 51568-99. ИСО 3310-1-90.** Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. М.: Изд-во стандартов, 2003.
25. **Дацко Т.Я., Зеленцов В.И.** Кинетика и механизм адсорбции метиленового голубого наноконпозитом TiO₂/диатомит и его компонентами // Электронная обработка материалов. 2023. Т. 59. № 3. С. 46–54. <https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.3.46>
26. **Доленко С.А., Попова В.В.** Сорбция метиленового синего на пенополиуретане и ее применение для определения анионных ПАВ // Химия и технология воды. 2012. Т. 34. № 1. С. 46–54.
27. **Везенцев А.И., Воловичева Н.А.** Сорбция метиленового голубого на новых комплексно-модифицированных литий-замещенных формах глин // Фундаментальные и прикладные исследования в системе образования: сб. науч. тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. (заочной). Тамбовский гос. ун-т, 26 февр. 2010 г. Тамбов, 2010. С. 266–268. <http://dspace.bsu.edu.ru/handle/123456789/18517>
28. **ГОСТ 17070-2014.** Угли. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2014.

Prospects for Obtaining Carbon Sorbents from D and DG Grade Coals

S. A. Shevyrev^{a, *}, S. S. Azikhanov^a, A. R. Bogomolov^a, and A. B. Kuznetsov^a

^a Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000 Russia

*e-mail: ssa.pmahp@kuzstu.ru

Abstract—The industrial production of carbon sorbents from coal is a promising and relevant direction. The starting material is mainly brown coal, which is characterized by a high yield of volatile substances and low ash content. Of particular interest to the coal industry is the development of technology for producing sorbents from low-grade coals with a large specific surface area, high adsorption activity, and low cost. Existing methods for producing sorbents from coals that meet such criteria should be based on various thermophysical principles of influence on the source material. The work investigated one-stage and two-stage methods for producing sorbents from coal grades D and DG mined in Kuzbass. The one-stage technique consisted of steam gasification of the starting material in a fluidized bed. The two-stage technique was based on preliminary decarbonization in a muffle furnace followed by activation with superheated water vapor in a fluidized bed. As a result of experimental studies, samples of carbon sorbents were obtained from coals of low metamorphism. Analysis of textural characteristics showed that the specific surface area of the sorbents is up to 250 m²/g and adsorption activity up to 100 mg/g. It has been established that the composition of the mineral mass of the original coals significantly affects the adsorption activity of the resulting sorbents. Estimates show that the higher the ash basicity index, the higher the adsorption activity of the resulting carbon sorbent. With a one-stage method for producing sorbents from coal grades D and DG in a fluidized bed, a fairly high specific surface area is achieved with a relatively low adsorption activity in comparison with a two-stage method.

Keywords: thermal coal, steam gasification, textural characteristics, specific surface area, adsorption activity, sorbent, mineral mass, ash basicity index