

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТОПЛИВА
И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
CHEMICAL TECHNOLOGY OF FUEL
AND HIGH-ENERGY SUBSTANCES**

Научная статья

УДК 661.183.2

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-1-43-51

**ОЦЕНКА РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ КАРБЕНИЗАТОВ БУРЫХ УГЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

**Федорова Наталья Ивановна,
Зыков Игорь Юрьевич**

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

*для корреспонденции: FedorovaNI@iccms.sbras.ru

**Информация о статье**

Поступила:

12 декабря 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 февраля 2024 г.

Принята к публикации:

29 февраля 2024 г.

Опубликована:

12 марта 2024 г.

Ключевые слова:

бурый уголь, карбонизаты,
термогравиметрический
анализ, реакционная
способность, температура
воспламенения, индекс
воспламенения.

Аннотация.

Традиционная технология получения углеродных сорбентов на основе каменных углей включает стадию карбонизации исходного сырья и стадию активации для развития пористой структуры, напрямую связанную с реакционной способностью карбонизатов по отношению к различного рода окислителям. Пористая структура и реакционная способность к окисляющим агентам являются предпосылками хорошей активируемости угольных карбонизатов. Следовательно, изучение процесса окисления углеродных материалов, различающихся по структуре и физико-химическим параметрам представляется актуальным.

Цель проведенного исследования – определение реакционной способности по отношению к кислороду пористых карбонизованных материалов посредством термогравиметрического анализа.

В качестве объектов исследования использовались пять карбонизатов, полученных на основе угля технологической марки Б. Образцы характеризуются различной зольностью, элементным составом, удельной поверхностью и общим объемом пор.

По результатам термогравиметрического анализа установлены температурные границы окислительного пиролиза исследованных образцов: температуры возгорания, температуры, при которых достигается максимальная скорость окисления, температуры полного сгорания, определены значения температурного интервала окисления. С учетом временных параметров рассчитаны индексы воспламенения и горения.

Установлено, что с увеличением параметра степени молекулярной ассоциированности веществ карбонизатов (s_A) наблюдаются уменьшения значений температурного интервала окислительной деструкции ($T_2 - T_1$), максимальной скорости потери массы (V_{max}), а также индекса окисления (S). Сравнительный анализ показал, что образцы карбонизатов с более низкими значениями температурных границ окислительного процесса обладают повышенной реакционной способностью по отношению к окислителю.

Для цитирования: Федорова Н.И., Зыков И.Ю. Оценка реакционной способности карбонизатов бурых углей с использованием термогравиметрического анализа // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 1 (161). С. 43-51. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-1-43-51, EDN: CVBDXK

Жесткие требования по сохранению чистоты воздушного и водного бассейнов, предъявляемые в настоящее время к промышленным предприятиям, делают необходимым применение адсорбционных методов очистки. В связи с этим потребность в адсорбентах постоянно возрастает.

Пористые углеродные адсорбенты находят широкое применение в различных отраслях промышленности: для очистки и разделения газов и жидкостей, рекуперации паров летучих растворителей, удаления различных экотоксикантов из водных растворов, как основа для каталитических и хемосорбционных добавок, а также в качестве поглотителей различного назначения [1,2]. Необходимым условием эффективного использования сорбционных материалов в том или ином процессе является соответствие их качества условиям данного процесса.

В качестве сырья для получения адсорбентов могут использоваться различные материалы органического происхождения: древесина, лигнин, фруктовые косточки, скорлупа различных орехов, торф и ископаемые угли [1-10].

Для получения углеродных сорбционных материалов в качестве сырья используется все разнообразие ископаемых углей, от бурых до антрацитов. Традиционная технология получения углеродных сорбентов на основе каменных углей включает стадию карбонизации исходного сырья для создания первичной структуры и стадию активации для развития пористой структуры, напрямую связанную с реакционной способностью карбонизатов по отношению к различного рода окислителям (кислород воздуха, CO₂, водяной пар) [11,12].

При определении свойств углеродных материалов важной характеристикой является показатель их реакционной способности (РС) по отношению к окислителям. Пористая структура и реакционная способность к окисляющим агентам являются предпосылками хорошей активируемости угольных карбонизатов. Следовательно, изучение процесса окисления углеродных материалов, различающихся по структуре и физико-химическим параметрам, представляется актуальным.

В настоящее время для определения РС углеродных материалов применяют термогравиметрический метод анализа. В качестве критериев используют показатели: температуру начала потери массы, температуру воспламенения, максимальную скорость окисления и температуру, соответствующую максимальной скорости окисления [12-15]

В данной работе приведены результаты исследований, целью которых являлось определение реакционной способности по отношению к кислороду пористых карбонизованных материалов методом термогравиметрического анализа.

Карбонизаты были получены в лабораторных условиях высокотемпературным пиролизом из бурого угля, отобранного на разрезе Березовский (Красноярский край) (A^d 5,0%, V^{daf} 44,2%, S_i^d 0,2%).

Для аналитических исследований (технический анализ, элементный состав) отбирали пробу карбонизата в количестве 20 г и измельчали ее до размера частиц менее 0,2 мм. Технический анализ проводили стандартными методами. Элементный состав органической массы образцов определяли с помощью элементного анализатора Thermo Flash 2000 (Thermo Fisher Scientific, Великобритания).

При использовании результатов элементного анализа карбонизатов были рассчитаны структурно-химические параметры – δ [16] и sA [17]. Структурный параметр δ характеризует степень ненасыщенности водородом единицы массы органического вещества и определяется по формуле: $\delta = \frac{1}{6} C^{daf} - H^{daf} + \frac{1}{14} N^{daf}$.

Параметр sA – это показатель степени молекулярной ассоциированности органического вещества, который рассчитывается по следующей формуле:

$$sA = 1 - \frac{H^{daf} + 0,125(O^{daf} + N^{daf} + S^{daf})}{0,333 C^{daf}}$$

где C^{daf} , H^{daf} , N^{daf} , S^{daf} и O^{daf} – содержание элементов в органической массе карбонизатов.

Величину удельной поверхности ($a_s(BET)$, м²/г) и характеристики пористой структуры (общий объем пор V_{Σ} , см³/г; объем мезо- и микропор V_{me} и V_{mi} , см³/г) изученных образцов углеродных материалов получали из анализа изотерм адсорбции-десорбции N₂ при -195,97°C (77,4 К), измеренных на объемной вакуумной статической установке ASAP-2020. Перед проведением адсорбционных измерений исследуемые образцы вакуумировали непосредственно в специальном порту прибора при 150°C в течение 15 часов до остаточного давления не менее 0,13 Па. Измерения изотерм адсорбции-десорбции азота вели в области равновесных относительных давлений паров от 10⁻³ до 0,996 P/P₀. Для определения удельной использовали модель Brunauer-Emmett-Teller (БЭТ), для расчета объема микропор применяли t-plot метод с использованием уравнения Harkins-Jura, объем мезопор рассчитывали методом Barrett-Joyner-Halenda (BJH). Средний диаметр пор оценивали по формуле $D_{cp} = 4 V_{\Sigma} / a_s(BET)$.

Таблица 1. Характеристика исследованных образцов карбонизатов

Table 1. Characteristics of the carbonized samples studied

Код образца	$A^d, \%$	Элементный состав, % на daf					Атомное отношение		Структурные параметры	
		C	H	N	S	O	H/C	O/C	δ	сА
3 о	2,0	86,3	0,9	0,9	0	11,9	0,13	0,10	13,5	0,91
2 о	1,8	89,9	0,8	0,9	0	8,4	0,11	0,07	14,2	0,93
1	8,0	95,6	0,7	0,8	0,2	2,7	0,08	0,02	15,3	0,96
3	8,8	96,8	0,4	0,6	0	2,2	0,05	0,02	15,8	0,98
2	10,1	97,8	0,4	0,4	0,1	1,3	0,05	0,01	15,9	0,98

Таблица 2. Текстульные характеристики исследованных образцов карбонизатов

Table 2. Textural characteristics of the carbonized samples studied

Код образца	$a_s(BET), \text{ м}^2/\text{г}$	$V_{\Sigma}, \text{ см}^3/\text{г}$	$V_{\text{микро}}, \text{ см}^3/\text{г}$	$V_{\text{мезо}}, \text{ см}^3/\text{г}$	$V_{\text{микро}}/V_{\Sigma}, \%$	$V_{\text{мезо}}/V_{\Sigma}, \%$	$D_{\text{pores}}, \text{ нм}$
3 о 9	504	0,248	0,141	0,104	56,8	41,9	2,0
2 о 8	472	0,240	0,130	0,110	54,2	45,8	2,0
1	259	0,104	0,083	0,021	79,8	20,2	1,6
3	288	0,154	0,071	0,078	46,1	50,6	2,1
2	307	0,165	0,080	0,085	50,6	52,5	2,1

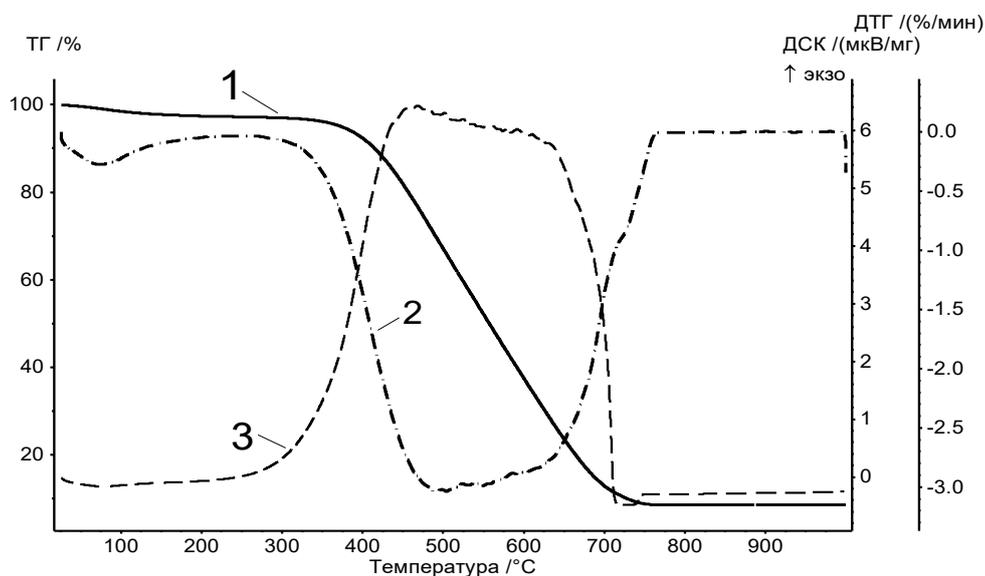


Рис. 1. Термогравиметрические кривые образца карбонизата №3:
1 – кривая потери массы ТГ, 2 – скорость потери массы ДТГ, 3 – кривая ДТА.

Fig. 1. Thermogravimetric curves of carbonizate sample No. 3:
1 – TG mass loss curve, 2 – DTG mass loss rate, 3 – DTA curve

Термогравиметрический анализ исследуемых образцов проводили на термоанализаторе фирмы Netzsch STA 409 в следующих условиях: масса образца 35 мг; тигель платиново-иридиевый; нагрев до 1000°C со скоростью – 10°C/мин в окислительной среде (смесь азота и воздуха, проток соответственно 20 и 60 см³/мин). В ходе анализа регистрировали потерю массы (ТГ), скорость потери массы (ДТГ) и кривые дифференциального термического анализа (ДТА). Температурный интервал основной окислительной деструкции на кривой ТГ устанавливали, используя метод касательных с помощью программного обеспечения Netzsch

Proteus. Для оценки реакционной способности использовали следующие показатели: T_B – температура возгорания, определяемая по началу перегиба кривой ДТА; T_1 – температура начала потери массы, определяемая по началу перегиба кривой ТГ; T_{max} – температура, при которой достигается максимальная скорость окисления, определяемая по кривой ДТГ; V_{max} – максимальная скорость в точке перегиба кривой ДТГ; T_2 – конечная температура, при которой происходит выгорание коксового остатка.

По данным термогравиметрического анализа определяли следующие характеристики: индекс воспламенения (D) и индекс горения (S) [14,15].

Таблица 3. Результаты термогравиметрического анализа исследованных образцов карбонизатов, проведенного в окислительной атмосфере
 Table 3. Results of thermogravimetric analysis of the studied carbonizate samples conducted in an oxidizing atmosphere

Код образца	Температурные границы основного разложения, °C					V_{\max} , %/min	$V_{\text{ср}}$, %/min	$D \cdot 10^{-4}$	$S \cdot 10^{-8}$
	T_B	T_1	T_{\max}	T_2	$\Delta t = T_2 - T_1$				
9	233	372	626	772	400	3,37	2,20	27	6,94
8	243	400	639	768	368	3,32	2,42	26	6,40
1	272	404	493	755	351	3,04	2,36	25	5,81
3	322	441	591	771	330	3,01	2,56	18	5,41
2	340	451	591	785	334	3,04	2,56	17	4,87

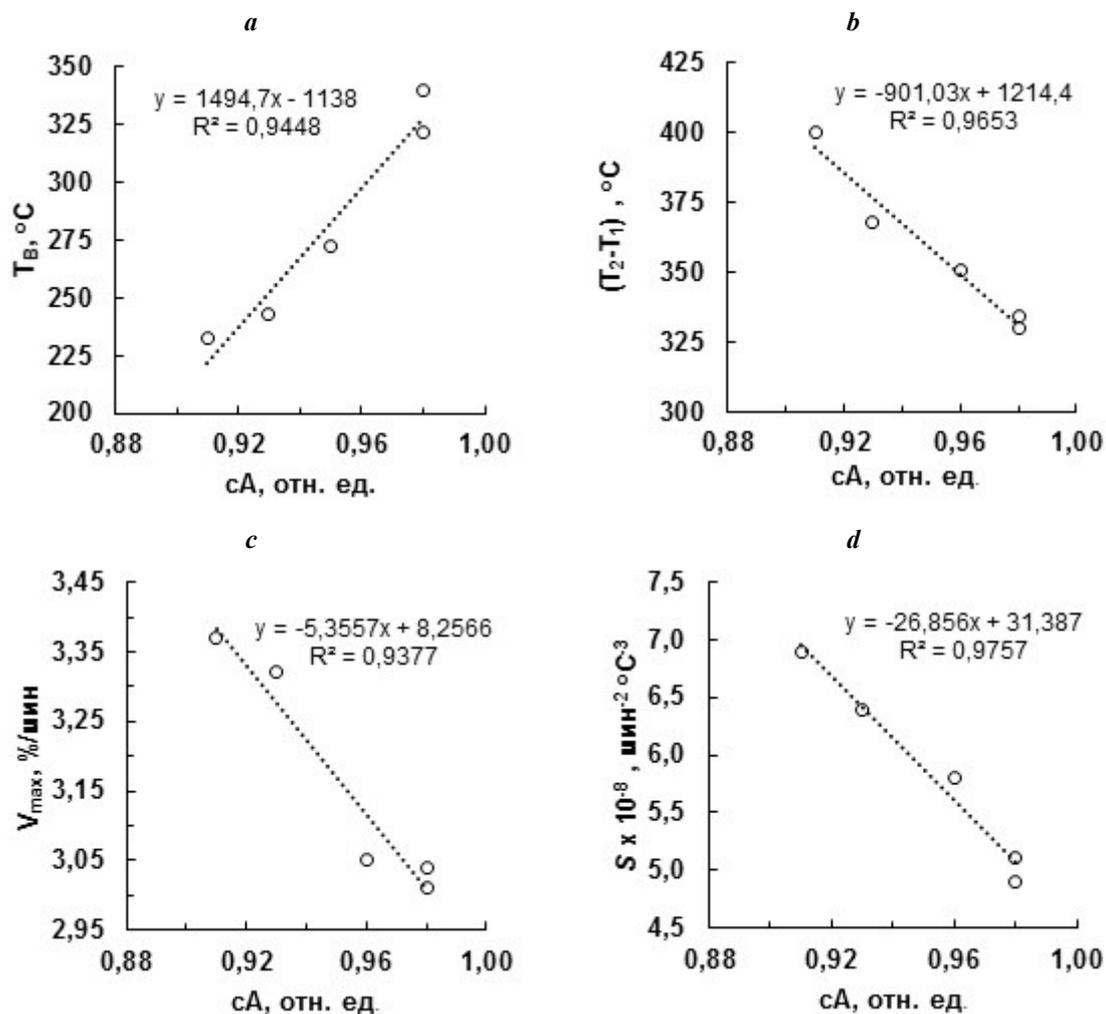


Рис. 2. Взаимосвязь показателя степени молекулярной ассоциированности веществ образцов карбонизатов (сА) с температурой воспламенения T_B (а), температурным интервалом окислительной термодеструкции $T_2 - T_1$ (б), максимальной скоростью окислительной термодеструкции V_{\max} (с) и индексом окисления S (д)

Fig. 2. The relationship of the degree of molecular association of substances of carbonizate samples (сА) with the ignition temperature of T_B (а), the temperature range of oxidative thermal degradation $T_2 - T_1$ (б), the maximum rate of oxidative thermal degradation V_{\max} (с) and the oxidation index S (д)

Данные индексы используются для сравнения горючести различных топлив, большие их значения характерны для топлив с высокими параметрами горения (окисления).

Расчет индексов воспламенения (D) и горения (S) производили по формулам:

$$D = \frac{V_{\max}}{t_1 \cdot t_{\max}}$$

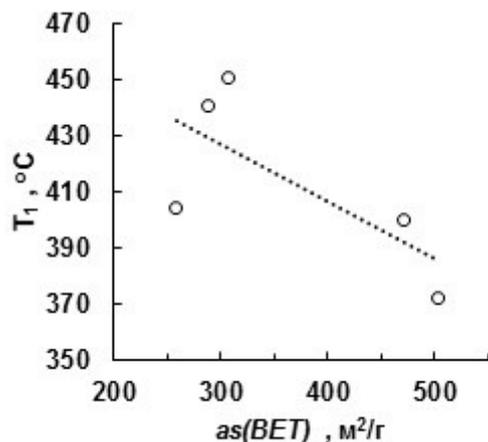


Рис. 3. Взаимосвязь температуры начала потери массы процесса окисления карбонатов и удельной поверхности

Fig. 3. The relationship between the temperature of the beginning of the mass loss of the oxidation process of carbonates and the specific surface area

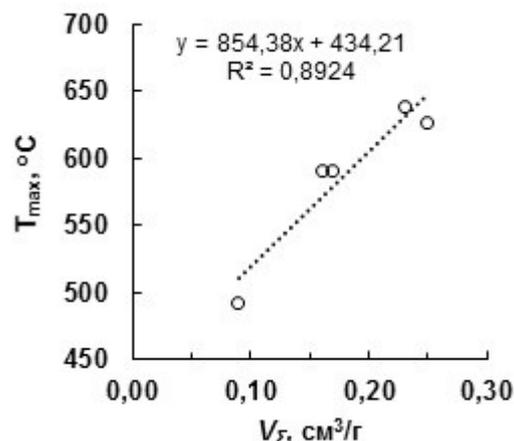


Рис. 4. Взаимосвязь температуры максимальной скорости потери массы карбонатов и общего объема пор

Fig. 4. The relationship between the temperature of the maximum mass loss rate of carbonates and the total pore volume

где V_{\max} – максимальная скорость потери массы, %/мин; t_1 и t_{\max} – время воспламенения и время, соответствующее максимальной скорости потери массы, мин.

Расчет индекса S производили по формуле:

$$S = \frac{V_{\max} V_{\text{cp}}}{T_B^2 T_2},$$

где V_{\max} – максимальная скорость потери массы, %/мин; V_{cp} – средняя скорость потери массы (от воспламенения до полного сгорания образца), %/мин; T_1 – температура начала потери массы (возгорания), °C; T_2 – температура полного выгорания образца, °C.

Характеристика исследованных карбонатов приведена в Таблице 1.

Видно, что образцы обладают различной зольностью, отличаются элементарным составом, атомным отношением Н/С и структурными параметрами. Уменьшение величины атомного отношения Н/С согласуется с ростом структурных параметров (δ и sA) органической массы образцов. Наибольшей величиной молекулярной ассоциированности органического вещества (параметр sA) характеризуются образцы №4 и №5.

Текстуальные характеристики исследованных карбонизованных материалов, полученные на основании интерпретации экспериментальных изотерм адсорбции–десорбции азота, представлены в Таблице 2. Анализ результатов показывает, что исследованные образцы обладают различной удельной поверхностью, величина которой изменяется в достаточно широком диапазоне величин – от 500 м²/г (образец №1) до 259 м²/г (образец №3). В образцах №4 и №5 объем пористого пространства представлен преимущественно

мезопорами (более 50%), а в образце №3 – микропорами (более 79%).

Кривые термогравиметрического анализа образцов карбонатов, проведенного в окислительной атмосфере, имеют подобный вид (Рис. 1).

При нагревании всех образцов до температуры порядка 150°C наблюдается потеря массы, связанная с выделением гигроскопической влаги. С повышением температуры в интервале температур 350–800°C происходит основная потеря массы образцами. Начало окисления характеризуется увеличением скорости потери массы (кривая ДТГ) до максимального значения, затем она несколько стабилизируется и при последующем увеличении температуры постепенно уменьшается до полного сгорания органического вещества углеродного материала. Интенсивная убыль массы во всех экспериментах сопровождается значительным выделением тепла – на кривой ДТА фиксируется ярко выраженный экзотермический пик.

Результаты обработки кривых термогравиметрического анализа приведены в таблице 3. Видно, что в ряду образцов карбонатов (от №1 к №5) снижается их реакционная способность по отношению к кислороду: повышаются значения температур процесса (температура возгорания T_B , температура начала потери массы T_1 , температура, при которой происходит полное выгорание коксового остатка T_2) и наблюдается снижение скорости окислительной деструкции V_{\max} .

Изменения значений данных параметров связаны с особенностями структуры

исследованных образцов. С увеличением параметра степени молекулярной ассоциированности веществ карбонизатов наблюдаются уменьшения значений температурного интервала окислительной деструкции (T_2-T_1), максимальной скорости потери массы V_{max} , а также индекса окисления (S) (Рис. 2). Также можно отметить тенденцию уменьшения температуры начала потери массы (T_1) с увеличением удельной поверхности образцов (Рис. 3), но при этом отмечается рост температуры максимальной скорости потери массы на фоне увеличения общего объема пор (Рис. 4).

Таким образом, сопоставление полученных результатов позволяет констатировать, что образцы карбонизатов №1, №2 и №3 обладают наиболее высокой реакционной способностью по отношению к кислороду. Следовательно, при получении сорбентов на их основе вторую стадию активации окисляющими агентами можно проводить в менее жестких условиях (при более низких температурах или меньших концентрациях окислителя).

Работа выполнена в рамках гос. задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН (проект 121031500194-5) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН. Авторы выражают благодарность Л.М. Хицовой за выполнение термогравиметрического анализа, В.Ю. Малышевой – элементного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров В.С., Бесараб С.В. Адсорбенты и носители катализаторов. Научные основы регулирования пористой структуры. М. : ИНФРА-М, 2024. 203 с.
2. Кинле Х., Бадер Э. Активные угли и их промышленное применение. Л. : Химия, 1984. 216 с.
3. Скугорева С. Г., Кантор Г. Я., Домрачева Л. И., Кутявина Т. И. Сравнительный анализ эффективности использования сорбентов различной природы по отношению к ионам меди (II) // Теоретическая и прикладная экология. 2018. №3. С.12–19. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-012-018.
4. Самонин В. В., Спиридонова Е. А., Зотов А. С. [и др.] Химическое строение, пористая структура и сорбционные свойства адсорбентов из органических техногенных субстратов // Журнал общей химии. 2021. Т. 91. №8. С. 1284–1308. DOI: 10.31857/S0044460X21080175.
5. Ставицкая С. С., Викарчук В. М., Цыба Н. Н. [и др.] Структурно-сорбционные свойства углеродных адсорбентов из отходов переработки древесины // Журнал прикладной химии. 2006. Т. 79. №2. С.220–225.
6. Шевелева И. В., Холмейдик А. Н., Войт А. В. [и др.] Извлечение ионов металлов сорбентами на основе рисовой шелухи // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82. №10. С. 1688–1692.
7. Жирнов Б. С., Сусликов А. В., Муртазин Ф. Р., Опарина Ф. Р. Исследование адсорбции фенола на различных углеродных материалах // Кокс и химия. 2023. №1. С. 45–50. DOI: 10.52351/00232815_2023_01_45.
8. Исобаев М. Д., Давлатназарова М. Д., Мингбоев Ш. А. Кислотная деминерализация и активация угольных сорбентов // Химия твердого топлива. 2019. №3. С. 48–50. DOI: 11.1134/S0023117719030058.
9. Фарберова Е. А., Олонцев В. Ф., Тиньгаева Е. А. Влияние параметров термического модифицирования бурых углей на их сорбционные свойства // Химия твердого топлива. 2017. №3. С. 51–57. DOI: 10.7868/S0023117717030082.
10. Козлов А. П., Зыков И. Ю., Дудникова Ю. Н. [и др.] Переработка бурых углей в эффективные сорбенты для решения задач охраны окружающей среды и повышения качества жизни // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. №3. С. 93–100. DOI: 10.26730/1999-4125-2008-3-93-100.
11. Головин Г. С., Малолетнев А. С. Комплексная переработка углей и повышение эффективности их использования. М. : НТК «Трек», 2007. 357 с.
12. Федорова Н. И., Дудникова Ю. Н., Хицова Л. М. [и др.] Характеристика пористой структуры и реакционная способность полукоксов каменных углей // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26. №6. С. 583–588. DOI: 10.15372/KhUR20180603.
13. Звягинцев Е. В., Скрипченко Г. Б. Оценка реакционной способности углеродных материалов на основе термогравиметрических данных // Химия твердого топлива, 2000. №5. С. 67–78.
14. Mureddu M. Air- and oxygen-blown characterization of coal and biomass by thermogravimetric analysis // Fuel. 2018. V. 212. P. 626–637. DOI: doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.005
15. Zheng S. [et al.] Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends // Journal of the Energy Institute. 2020. V. 93. P. 1373–1381. DOI: doi.org/10.1016/j.joei.2019.12.007
16. Гюльмалиев А. М., Головин Г. С., Гагарин С. Г. Классификация горючих ископаемых по структурно-химическим показателям и основные пути использования ископаемы углей. М. : НТК «Трек», 2007. 152 с.
17. Веселовский В. С. Химическая природа горючих ископаемых. М. : Изд-во АН СССР, 1955. 424.
18. Жуйков А. В. Влияние скорости нагрева на характеристики совместного горения каменного угля и бумажных отходов // Кокс и химия. 2023. №11. С. 45–52. DOI: 10.52351/00232815_2023_11_45

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Федорова Наталья Ивановна, канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, (650000, Россия, г. Кемерово, Советский пр., 18), e-mail: FedorovaNI@iccms.sbras.ru

Зыков Игорь Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, (650000, Россия, г. Кемерово, Советский пр., 18), e-mail: zyak.kot@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Федорова Наталья Ивановна – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Зыков Игорь Юрьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

EVALUATION OF THE REACTIVITY OF BROWN COAL CARBONATES USING THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS

Natalia I. Fedorova
Igor Yu. Zыkov

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS

*for correspondence: FedorovaNI@iccms.sbras.ru



Article info

Received:

12 December 2023

Accepted for publication:

15 February 2024

Accepted:

29 February 2024

Published:

12 March 2024

Keywords: brown coal, carbonisates, thermogravimetric analysis, reactivity, ignition temperature, ignition index

Abstract.

The traditional technology for producing carbon sorbents based on hard coals includes a carbonation stage of the feedstock and an activation stage for the development of a porous structure, directly related to the reactivity of carbonizates with respect to various kinds of oxidants. The porous structure and reactivity to oxidizing agents are prerequisites for good activability of carbon carbonates. Therefore, the study of the oxidation process of carbon materials that differ in structure and physico-chemical parameters is relevant.

The purpose of the study is to determine the reactivity to oxygen of porous carbonized materials by thermogravimetric analysis.

Five carbonates obtained on the basis of coal of technological grade B. The samples are characterized by different ash content, elemental composition, specific surface area and total pore volume.

Based on the results of thermogravimetric analysis, the temperature limits of oxidative pyrolysis of the studied samples were established: ignition temperatures, temperatures at which the maximum oxidation rate is reached, complete combustion temperatures, and the values of the oxidation temperature range were determined. Taking into account the time parameters, the ignition and combustion indices are calculated. Gorenje.

It was found that with an increase in the parameter of the degree of molecular association of carbonizate substances (cA), there is a decrease in the values of the temperature range of oxidative degradation (T_2-T_1), the maximum rate of mass loss (V_{max}), as well as the oxidation index (S). Comparative analysis has shown that carbonizate samples with lower temperature limits of the oxidation process have an increased reactivity with

respect to oxidants.

For citation: Fedorova N.I., Zykov I.Yu. Evaluation of the reactivity of brown coal carbonates using thermogravimetric analysis. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 1(161):43-51. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-1-43-51, EDN: CBBDXK

REFERENCES

1. Komarov V.S., Besarab S.V. Adsorbenty i nositeli katalizatorov. Nauchnye osnovy regulirovaniya poristoj struktury. M.: INFRA-M; 2024. 203 s.
2. Kinle H., Bader Je. Aktivnye ugli i ih promyshlennoe primenenie. L.: Himija; 1984. 216 s.
3. Skugoreva S.G., Kantor G.Ja., Domracheva L.I., Kutjavina T.I. Sravnitel'nyj analiz jeffektivnosti ispol'zovanija sorbentov razlichnoj prirody po otnosheniju k ionam medi (II). *Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija*. 2018; 3:12–19. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-012-018
4. Samonin V.V., Spiridonova E.A., Zotov A.S. [i dr.] Himicheskoe stroenie, poristaja struktura i sorbcionnye svojstva adsorbentov iz organicheskikh tehnogennyh substratov. *Zhurnal obshhej himii*. 2021; 91(8):1284–1308. DOI: 10.31857/S0044460X21080175.
5. Stavickaja S.S., Vikarchuk V.M., Cyba N.N. [i dr.] Strukturno-sorbcionnye svojstva uglerodnyh adsorbentov iz othodov pererabotki drevesiny. *Zhurnal prikladnoj himii*. 2006; 79(2):220–225.
6. Sheveleva I.V., Holomejdik A.N., Vojt A.V. [i dr.] Izvlechenie ionov metallov sorbentami na osnove risovoj sheluhi. *Zhurnal prikladnoj himii*. 2009; 82(10):1688–1692.
7. Zhirnov B.S., Suslikov A.V., Murtazin F.R., Oparina F.R. Issledovanie adsorbicii fenola na razlichnyh uglerodnyh materialah. *Koks i himija*. 2023; 1:45–50. DOI: 10.52351/00232815_2023_01_45
8. Isobaev M.D., Davlatnazarova M.D., Mingboev Sh.A. Kislotnaja demineralizacija i aktivacija ugol'nyh sorbentov. *Himija tverdogo topliva*. 2019; 3:48–50. DOI: 11.1134/S0023117719030058
9. Farberova E.A., Oloncev V.F., Tin'gaeva E.A. Vlijanie parametrov termicheskogo modifizirovaniya buryh uglej na ih sorbcionnye svojstva. *Himija tverdogo topliva*. 2017; 3: 51–57. DOI: 10.7868/S0023117717030082
10. Kozlov A.P., Zykov I.Ju., Dudnikova Ju.N. [i dr.] Pererabotka buryh uglej v jeffektivnye sorbenty dlja reshenija zadach ohrany okruzhajushhej sredy i povyshenija kachestva zhizni. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018; 3:93–100. DOI: 10.26730/1999-4125-2008-3-93-100.
11. Golovin G.S., Maloletnev A.S. Kompleksnaja pererabotka uglej i povyshenie jeffektivnosti ih ispol'zovanija. M.: NTK «Trek»; 2007. 357 s.
12. Fedorova N.I., Dudnikova Ju.N., Hicova L.M. [i dr.] Harakteristika poristoj struktury i reakcionnaja sposobnost' polukoksov kamennyh uglej. *Himija v interesah ustojchivogo razvitija*. 2018; 26(6):583–588. DOI: 10.15372/KhUR20180603.
13. Zvjagincev E.V., Skripchenko G.B. Ocenka reakcionnoj sposobnosti uglerodnyh materialov na osnove termogravimetriceskikh dannyh. *Himija tverdogo topliva*. 2000; 5:67–78.
14. Mureddu M. Air- and oxygen-blown characterization of coal and biomass by thermogravimetric analysis. *Fuel*. 2018; 212:626–637. DOI: doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.005.
15. Zheng S. [et al.] Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *Journal of the Energy Institute*. 2020; 93:1373–1381. DOI: doi.org/10.1016/j.joei.2019.12.007.
16. Gjul'maliev A.M., Golovin G.S., Gagarin S.G. Klassifikacija gorjuchih iskopaemyh po strukturno-himicheskim pokazateljam i osnovnye puti ispol'zovanija iskopaemy uglej. M.: NTK «Trek»; 2007. 152 s.
17. Veselovskij V.S. Himicheskaja priroda gorjuchih iskopaemyh. M.: Izd-vo AN SSSR; 1955. 424.
18. Zhujkov A.V. Vlijanie skorosti nagreva na harakteristiki sovmestnogo gorenija kamennogo uglja i bumazhnyh othodov. *Koks i himija*. 2023; 11:45–52. DOI: 10.52351/00232815_2023_11_45.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Izatullo N. Ganiev, Academician of NANT, Doctor of Economics, Professor, head. laboratory of the National Research University "V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan", Address: Republic of Tajikistan, 734063, Dushanbe, Aini ave., 299/2, tel.: (+992) 93-572-88-99, E-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Gulnoza M. Rakhmatulloeva, Senior Researcher at the State Institution "Center for Research of Innovative Technologies of the National Academy of Sciences of Tajikistan", tel.: (+992) 77-007-92-02, E-mail: Golnoz.86@mail.ru

Natalia I. Fedorova, C. Sc. in Chemistry, leading researcher, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, (650000, Kemerovo, 18, pr. Sovietsky, Russian Federation), e-mail: FedorovaNI@iccms.sbras.ru

Igor Yu. Zykov, C. Sc. in Physics and Mathematics, researcher, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, (650000, Kemerovo, 18, pr. Sovietsky, Russian Federation), e-mail: zyak.kot@mail.ru

Contribution of the authors:

Natalia I. Fedorova – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

Igor Yu. Zykov – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

All authors have read and approved the final manuscript.

