

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОСОРТНОГО УГОЛЬНОГО СЫРЬЯ ПУТЁМ ВНЕСЕНИЯ ДОБАВОК КАРБОНАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

А. А. Дука¹, М. А. Пашкевич¹, И. П. Сверчков¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург,
199106, Россия, rectorat@spmi.ru

Аннотация: В работе рассматривается перспективность использования углесодержащих отходов в качестве топливного сырья. Образцами для исследования являлись отходы обогащения углей (ООУ) Кузнецкого бассейна и золошлаковые отходы (ЗШО) котельных цеха тепловодоснабжения горнодобывающего предприятия. Для увеличения эффективности их термической утилизации выполнена оценка возможности добавления реагентов-катализаторов, а именно карбонатов калия и натрия. Проведены термогравиметрический анализ и дифференциально-сканирующая калориметрия, определение удельной площади поверхности и исследование поверхности методом электронной микроскопии. На основании результатов лабораторных исследований были рассчитаны скорости горения отходов обогащения угля и золошлаковых отходов в зависимости от типа и количества добавки, определен механизм их взаимодействия. По данным термогравиметрического анализа установлены значения параметров горения: температуры максимальной потери массы, температуры воспламенения и температуры выгорания, средней и максимальной скоростей потери массы, индексов воспламеняемости и горения, а также комплексного индекса горения. Рассчитаны энергии активации процесса окисления с применением изоконверсионного метода. По полученным данным сделан вывод о перспективности использования щелочных добавок при термической утилизации низкосортного углесодержащего сырья. Установлено, что наибольшей эффективностью обладает добавка K_2CO_3 в количестве 10%_{масс.}

Ключевые слова: отходы обогащения угля, золошлаковые отходы, термическая утилизация, щелочные металлы, катализатор, термогравиметрия, кинетический анализ.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024–0005).

Для цитирования: Дука А. А., Пашкевич М. А., Сверчков И. П. Повышение эффективности термической утилизации низкосортного угольного сырья путём внесения добавок карбонатов щелочных металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11-1. – С. 113–130. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_113.

Efficiency enhancement of thermal utilization of low-grade carbon-containing raw materials by adding alkali metal carbonates

A. A. Duka¹, M. A. Pashkevich¹, I. P. Sverchkov¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia,
rectorat@spmi.ru

Abstract: The study explores the potential of using carbon-containing wastes as fuel raw materials. The research samples were coal preparation waste (CPW) from the Kuznetsk Basin and ash and slag waste (ASW) from the boiler house of the mining enterprise's heat and water supply department. To enhance the efficiency of their thermal utilization, the possibility of adding reagent-catalysts, potassium and sodium carbonates, has been evaluated. The experimental methods included thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, specific surface area determination, and scanning electron microscopy. Based on laboratory studies, the combustion rates of coal enrichment wastes and ash and slag wastes were calculated depending on the type and amount of additives. The mechanism of their interaction was also determined. Thermogravimetric analysis provided data to establish the values of combustion parameters: temperature of maximum mass loss, ignition and burnout temperatures, average and maximum mass loss rates, combustion index and ignition index, as well as a comprehensive combustion characteristic index. Activation energies of the oxidation process were calculated using isoconversional method. Based on the obtained data, the conclusion was made about the promising use of alkaline additives in the thermal utilization of low-grade carbon-containing raw materials. K_2CO_3 additive in the amount of 10% mass demonstrates the highest efficiency.

Key words: Coal preparation wastes, ash and slag wastes, thermal utilization, alkali metals, catalyst, thermogravimetry, kinetic analysis.

Acknowledgements: This investigation was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRW-2024-0005).

For citation: Duka A. A., Pashkevich M. A., Sverchkov I. P. Efficiency enhancement of thermal utilization of low-grade carbon-containing raw materials by adding alkali metal carbonates. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11-1):113–130. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_113.

1. Введение

Мировой рынок предъявляет всё более высокие требования к качеству угля, что приводит к развитию технологий его обогащения [1]. Объем переработки угля на территории Российской Федерации в 2022 году составил 200,4 млн тонн [2]. Однако с ростом объемов обогащения происходит увеличение количества образуемых отходов, что негативно влияет на экономическую эффективность угольной отрасли. Кроме того, в России ежегодно образуется до 20 млн тонн отходов, представленных золошлаками, после сжигания угля на тепловых электростанциях [3]. Конечным этапом в обращении с перечисленными отходами в большинстве случаев является их захоронение, что приводит к значительным негативным последствиям для природной среды, кроме того, остается невостребованным ценный сырьевой ресурс [4, 5]. Насып-

ные и намывные техногенные массивы предприятий по добыче и переработке минерального сырья являются значительными источниками поступления загрязняющих веществ в природные компоненты, что увеличивает антропогенную нагрузку на окружающую среду [6–8]. Вторичное использование низкосортного угольного сырья позволит снизить негативное воздействие и увеличить рентабельность угольной промышленности.

Перспективным направлением утилизации углесодержащих отходов является их применение в качестве компонентов топливных смесей. Для повышения экологической безопасности и эффективности процесса термической переработки требуется применение реагентов-катализаторов. Особый интерес представляют щелочные катализаторы, которые характеризуются значительной ката-

литической активностью и источником которых могут служить промышленные и сельскохозяйственные отходы [9, 10].

Катализаторы способны оптимизировать процесс термодеструкции углеродных материалов за счет снижения температуры окисления, увеличения степени конверсии, а также уменьшения выхода загрязняющих веществ с отходящими газами [11]. Однако влияние щелочного реагента на сжигание зависит от множества факторов, таких как тип сырья, состав золы и условия процесса горения [12]. Для подбора наиболее эффективного реагента необходимо изучение процесса каталитического сжигания применительно к определенным видам отходов. В настоящее время существуют научные работы, указывающие на то, что в процессе горения щелочные металлы выступают как активные центры, способствуя разрыву связей в углеродсодержащих материалах [13]. Несмотря на обширность исследований в данной области, редко встречаются работы, описывающие непосредственно механизм реакции каталитического горения для конкретного реагента [14, 15].

Потенциалом для применения в качестве источника щелочного катализатора при термической конверсии углеродсодержащего сырья обладает зола растительной биомассы [16, 17]. Добавление золы позволяет снизить температуру процесса, уменьшая энергозатраты и повышая экономическую эффективность термической утилизации [18, 19]. Кроме того, происходит снижение выбросов загрязняющих веществ за счет проведения сжигания в более низком температурном диапазоне и связывания кислых газов компонентами золы, что обеспечивает повы-

шение экологической безопасности утилизации отходов [20–22].

Целью данного исследования являлась оценка перспективности использования щелочной добавки для повышения эффективности термической утилизации углеродсодержащих отходов.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы

В качестве компонентов топливных смесей в данном исследовании использовались отходы обогащения углей (ООУ) и золошлаковые отходы (ЗШО). Отходы обогащения представляли собой мелкодисперсные угольные частицы и пустую породу, полученные в ходе сепарации различных марок угля Кузнецкого угольного бассейна на обогащательной фабрике. Золошлаки были получены от котельных цеха теплоснабжения горнодобывающего предприятия и являлись смесью шлаков, недожога и зол уноса.

Пробы отходов подвергались измельчению при помощи щековой дробилки Fritsch Pulverisette 1 и далее шаровой мельницы Spex SamplePrep 8000D. Размер частиц составил менее 100 мкм.

В табл. 1 представлены характеристики используемых отходов, определенные по стандартным методикам. Для определения W , A^d использовали термогравиметрический анализатор LECO TGA-701 согласно ГОСТ Р 52911–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги» и ГОСТ Р 55661–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности». Анализ на содержание летучих компонентов проводился в соответствии с ГОСТ Р 55660–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ». Содержание C , H , N , S определяли при помощи элементного анализатора с модулем

для определения серы LECO CHN628S согласно ГОСТ 32979–2014 «Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота» и ГОСТ 32465–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектрометрии». Установление высшей теплоты сгорания проводилось с использованием бомбового калориметра IKA C2000 basic в соответствии с ГОСТ 147–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания». Значения содержания кислорода и низшей теплоты сгорания были получены расчетным методом.

Высокие значения удельной теплоты сгорания и содержания топливных элементов подтверждают возможность использования рассматриваемых отходов в качестве компонентов топливных смесей [23].

К исходным материалам добавляли порошкообразные Na_2CO_3 и K_2CO_3 путем механического перемешивания. Содержание карбонатов в смесях составляло 1, 3, 5, 10, 15, 20%_{масс.} Гомогенизация образцов проводилась в лабораторном блендере IKA M20.

2.2. Термогравиметрический анализ

В целях выявления влияния добавок щелочных металлов на скорость

горения углеродсодержащих отходов был проведен термогравиметрический анализ при помощи анализатора LECO TGA-701. Экспериментальные параметры: сжигание в воздухе; I этап — нагрев образцов от комнатной температуры до 105°C со скоростью нагрева 5°C/мин, II этап — нагрев образцов до 900°C со скоростью нагрева 5°C/мин.

2.3. Определение удельной площади поверхности

Для подтверждения гипотезы об изменении структуры углеродсодержащих материалов при термической обработке совместно с карбонатами щелочных металлов было проведено измерение удельной поверхности отходов и их смесей. Предварительно проводился нагрев проб без доступа O_2 от комнатной температуры до 900°C со скоростью 50°C/мин.

Удельная площадь поверхности материалов определялась на установке Клячко–Гурвича. Анализ заключался в измерении количества адсорбированного на поверхности образца азота из воздуха при температуре жидкого азота. Количество сорбированного газа определялось путем регистрации изменения давления в установке. Далее проводился пересчет на площадь поверхности материала.

Таблица 1

Основные топливные характеристики используемых компонентов [составлено авторами]

Key fuel characteristics of the components [compiled by the authors]

Образец	W*, %	A ^d , %	V ^d , %	C ^d , %	H ^d , %	N ^d , %	S ^d , %	O ^d , %	Q, МДж/кг
ООУ	1,7	32,0	14,5	58,50	3,00	1,51	0,35	3,32	22,78
ЗШО	6,6	32,2	12,3	57,70	1,54	0,54	0,19	1,44	20,90

*W — влажность; A^d — зольность на сухое состояние; V^d — выход летучих веществ на сухое состояние; C^d, H^d, N^d, S^d, O^d — содержание углерода, водорода, азота, серы и кислорода на сухое состояние соответственно; Q — удельная теплота сгорания.

2.4. Электронная микроскопия

Исследование поверхности углеродсодержащих отходов и смесей на их основе после нагрева проводилось методом электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-6460LV Jeol с энергодисперсионным спектрометром Inca X-act Oxford Instruments Analytical.

2.5. ТГА/ДСК-анализ

Для определения кинетических параметров термодеструкции низкорекрационных углеродсодержащих отходов и смесей на их основе проводили ТГА/ДСК-анализ на анализаторе TGA/DSC1 LF/1600 METTLER-TOLEDO. Сжигание проводилось в воздухе при постоянной скорости потока 30 см³/мин. Для анализа использовались корундовые тигли, масса навески образца составляла 30 ± 1 мг.

На первом этапе происходил нагрев образца от 25°C до 105°C (скорость 5°C/мин) для удаления влаги. Далее проба нагревалась до 1000°C и выдерживалась при изотермическом режиме 15 минут. Анализ проводился при трех скоростях нагрева — 5, 15 и 30 °C/мин. Регистрация изменения массы и теплового потока проводилась непрерывно в динамических условиях.

2.6. Обработка данных

Параметры горения определяли по полученным в ходе ТГА/ДСК-анализа кривым потери массы (ТГ) и скорости потери массы (ДТГ).

Для оценки процесса устанавливались следующие параметры: температура воспламенения (T_i), температура выгорания (T_b), температура максимальной потери массы (T_{max}), максимальная скорость потери массы (R_{max}), средняя скорость потери массы (R_{mean}) [24, 25].

Максимальная скорость потери массы (R_{max}) представляет собой ско-

рость потери массы в точке пика ДТГ, а максимальная температура потери массы (T_{max}) — соответствующую температуру.

Индекс горения (C_b) рассчитывался по формуле

$$C_b = \frac{R_{max}}{T_i^2}. \quad (1)$$

Индекс воспламеняемости (G), отражающий способность топливной смеси к воспламенению, рассчитывался по формуле

$$G = \frac{R_{max}}{T_i \cdot T_{max}}. \quad (2)$$

Анализ интенсивности и скорости процесса горения проводили методом расчета комплексного индекса горения (S) [24, 25]:

$$S = \frac{R_{max} \cdot R_{mean}}{T_i^2 \cdot T_{max}}. \quad (3)$$

Температурная зависимость реакций в общем виде описывается уравнением Аррениуса:

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (4)$$

где A — предэкспоненциальный множитель (мин⁻¹), E — энергия активации (Дж/моль), R — универсальная газовая постоянная (Дж/(моль·°C)), T — абсолютная температура (К).

Определение аррениусовских параметров (энергии активации и предэкспоненциального множителя) является одной из основных задач при кинетической обработке данных [26, 27].

Применительно к кинетике твердофазных процессов скорость гетерогенной реакции выражается следующей формулой [28, 29]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha), \quad (5)$$

где α – степень конверсии (мин^{-1}), t – время (мин), $f(\alpha)$ – функция, описывающая механизм реакции.

Степень конверсии можно представить в следующем виде:

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_f}, \quad (6)$$

где m_0 – начальная масса образца (мг), m_t – масса образца в определенный момент времени (мг), m_f – конечная масса образца в данной реакции (мг).

При замене $k(T)$ в формуле (5) на уравнение Аррениуса температурная зависимость скорости реакции принимает вид [28]

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha). \quad (7)$$

При линейном нагреве

$$\left(\beta = \frac{dT}{dt} = \text{const}, \beta - \text{ скорость нагрева}\right)$$

(К/мин)) справедливо равенство

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{A}{\beta} e^{\frac{-E}{RT}} f(\alpha). \quad (8)$$

Существуют различные подходы к расчету аррениусовских параметров реакции, включая модельные и безаприорные методы. В неизотермической кинетике для получения достоверных данных о параметрах топахимических реакций используют ряд изоконверсионных методов, основанных на серии опытов с различными скоростями нагрева [28, 29]. Наибольшее распространение среди дифференциальных методов изоконверсионного анализа получил метод Фридмана [30].

Для неизотермического анализа уравнение Фридмана имеет следующий вид:

$$\ln \left[\beta_i \left(\frac{d\alpha}{dT} \right)_{\alpha,i} \right] = \ln [f(\alpha)A_\alpha] - \frac{E_\alpha}{RT_{\alpha,i}}. \quad (9)$$

Для расчета энергии активации по методу Фридмана использовались данные ТГА/ДСК-анализа при трех скоростях нагрева.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Термогравиметрический анализ

На рис. 1 представлены зависимости времени полного сгорания образцов от количества вносимой добавки, полученные по результатам термогравиметрического анализа.

Как можно видеть из графиков (см. рис. 1), при увеличении количества добавки сокращается время озоления образцов. Следует отметить, что добавка K_2CO_3 для всех соотношений более эффективна в сравнении с добавкой Na_2CO_3 . При увеличении содержания добавок до 10%_{масс.} скорость горения возрастает линейно, а затем заметно снижается.

Увеличение массовой доли добавок в составе смесей приводит к интенсификации процесса шлакообразования при термической обработке, что можно наблюдать на рис. 2.

При содержании добавок 3%_{масс.} плавление не наблюдается. При добавлении 10%_{масс.} образец с карбонатом натрия после сжигания образовал стекловидный остаток, а зола образца, содержащего карбонат калия, не изменила свою структуру. Добавка 20%_{масс.} Na_2CO_3 привела к полному сплавлению образца, в том числе и с материалом тигля, а в зольном остатке, содержащем K_2CO_3 , только начались процессы сплавления, о чем свидетельствует уменьшение объема в сравнении с образцами на рис. 2, з, д.

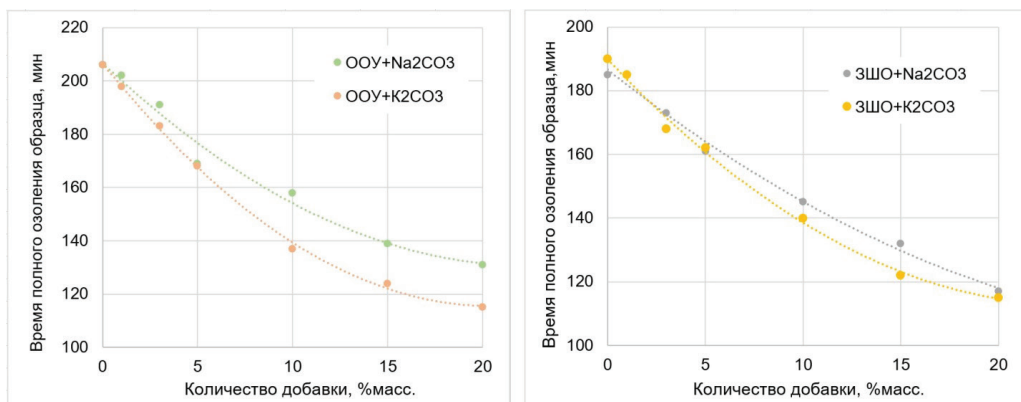


Рис. 1. Графики зависимости времени сгорания образцов от содержания добавки [составлено авторами]

Fig. 1. Graphs of the dependence of sample combustion time on additive content [compiled by the authors]

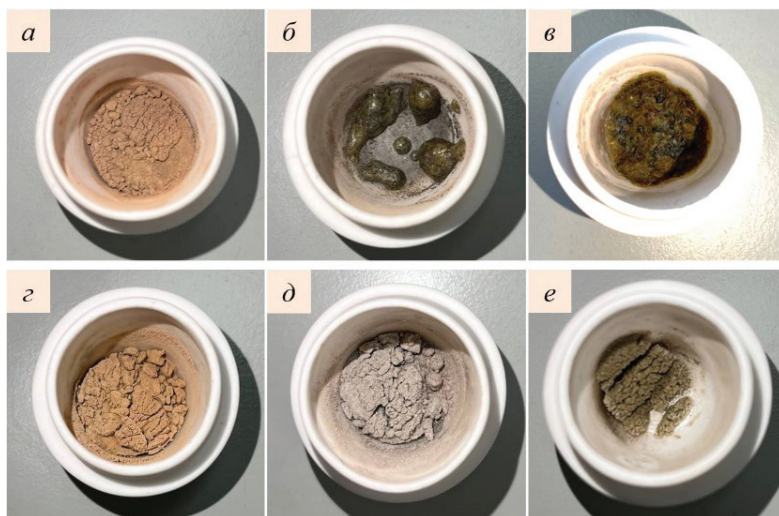


Рис. 2. Внешний вид зольного остатка смесей на основе ЗШО: а – ЗШО + Na₂CO₃ 3%; б – ЗШО + Na₂CO₃ 10%; в – ЗШО + Na₂CO₃ 20%; г – ЗШО + K₂CO₃ 3%; д – ЗШО + K₂CO₃ 10%; е – ЗШО + K₂CO₃ 20% [составлено авторами]

Fig. 2. Appearance of the ash residue from ASW-based mixtures: а – ASW + Na₂CO₃ 3%; б – ASW + Na₂CO₃ 10%; в – ASW + Na₂CO₃ 20%; г – ASW + K₂CO₃ 3%; д – ASW + K₂CO₃ 10%; е – ASW + K₂CO₃ 20% [compiled by the authors]

Таким образом, добавление более 3%_{масс.} карбоната натрия может привести к повреждению футеровки печи котельного агрегата и шлакованию поверхностей нагрева и колосниковых решеток [31]. Добавление в состав топлива карбоната калия даже в коли-

честве 20%_{масс.} не оказывает существенных негативных последствий при сжигании.

Исходя из полученных результатов, перспективным является использование добавок карбоната калия в количестве 10%_{масс.}

3.2. Исследование поверхности

Результаты измерения удельной площади поверхности образцов после термической обработки представлены в табл. 2.

Наблюдается увеличение удельной площади поверхности при добавлении карбоната калия, что свидетельствует о формировании пустот на поверхности частиц и их фрагментации. Полученные результаты подтверждаются фотографиями поверхности образцов (рис. 3).

Можно сделать вывод о том, что механизм взаимодействия углеродсодержащих отходов с добавками заключается в нарушении структурных связей С-С материала за счет происходящих реакций окисления и последующем образовании более мелких частиц с увеличенной площадью поверхности.

Процесс катализа низкорекрационного угля направлен на окисление фиксированного углерода. Большая часть исследователей склоняется к окислительно-восстановительному циклу в качестве механизма каталитического действия щелочных металлов на углеродные структуры [13, 32–34]. Лимитирующей стадией процесса горения является диффузия кислорода. Карбонаты щелочных металлов позволяют изменить механизм реакции и снизить ее энергию активации.

Карбонат калия при термическом воздействии разлагается по реакции



Оксид металла выступает в качестве активного транспорта кислорода к атомам углерода. При взаимодействии оксида с углеродом образуется моно-

Таблица 2

Удельная площадь поверхности отходов и их смесей после нагревания [составлено авторами]
Specific surface area of waste and its mixtures after heating [compiled by the authors]

Образец	Удельная поверхность, м ² /г
ЗШО	140 ± 14
ЗШО + 10% K ₂ CO ₃	230 ± 23
ООУ	64 ± 6
ООУ + 10% K ₂ CO ₃	79 ± 8

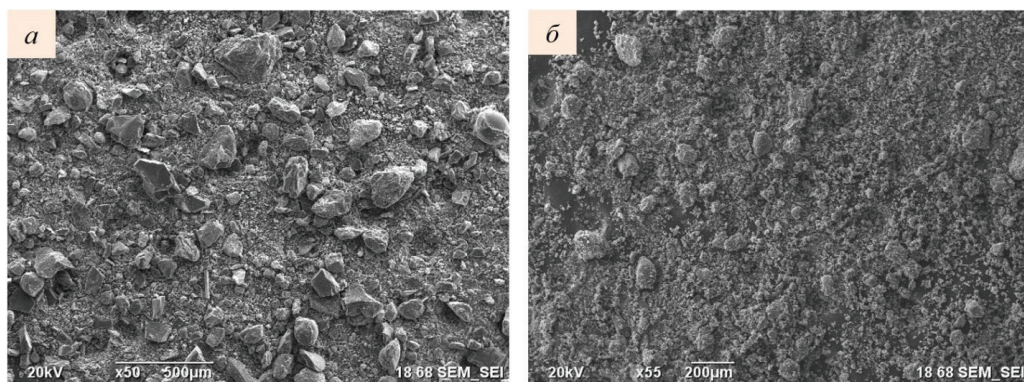
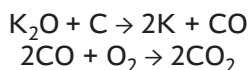


Рис. 3. Поверхность образцов после нагрева: а – ООУ; б – ООУ+ K₂CO₃ 10%_{масс.} [составлено авторами]

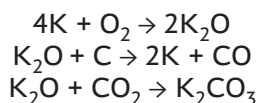
Fig. 3. The surface of the samples after heating: a – CPW; б – CPW+ K₂CO₃ 10%_{mass.} [compiled by the authors]

оксид углерода, который далее окисляется до CO_2 :



Добавление соединения металла позволяет инициировать каталитическое горение за счет ускорения диффузии кислорода к атомам углерода и образования пор.

Непрерывное ускорение реакции горения достигается за счет регенерации оксида, а затем карбоната металла:



То есть металл находится в цикле $\text{K}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{K}_2\text{O} \leftrightarrow \text{K}$ на протяжении всего процесса.

3.3. Определение характеристик горения

Термогравиметрические (ТГ) кривые и дифференциальные термогравиметрические (ДТГ) кривые исследуемых образцов представлены на рис. 4, 5.

По кривой ДТГ процесс горения образцов можно разделить на три этапа. Первый этап лежит в диапазоне температур 25–250°C и характеризуется

процессом дегидратации. Наибольшая скорость потери массы наблюдается у образцов с добавкой, что связано с наличием влаги в реактиве K_2CO_3 . Незначительное увеличение массы, наблюдаемое на профиле ТГ при низких температурах, может быть связано с хемосорбцией кислорода на поверхности образцов, сопровождающейся образованием поверхностных кислородсодержащих комплексов [35].

Второй и третий этапы плохо дифференцированы между собой в связи с наложением пиков на профиле ДТГ. Данное явление обусловлено отсутствием четкого разделения процессов дегазации и горения углеродного остатка по причине низкого содержания летучих веществ и наличия фиксированного углерода в образцах. Однако можно отметить, что выделение и сжигание летучих веществ происходит в температурном диапазоне 250–600°C. Второй экзотермический эффект происходит при температуре выше 600°C, сопровождается наибольшей конверсией образцов и связан с сжиганием углеродного остатка.

При добавлении карбоната калия к образцам отходов происходит смещение пика максимальной скорости

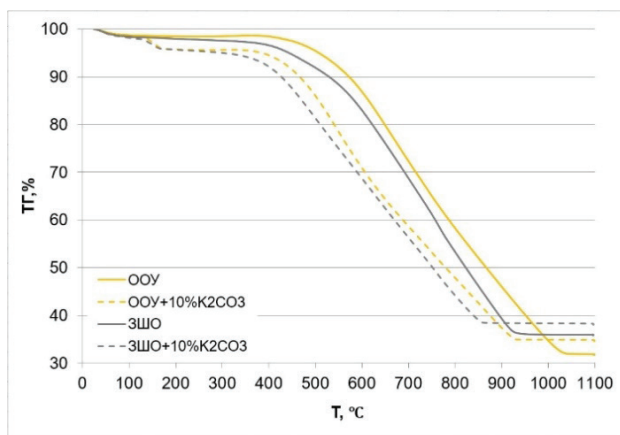


Рис. 4. ТГ кривые образцов [составлено авторами]

Fig. 4. TG curves of the samples [compiled by the authors]

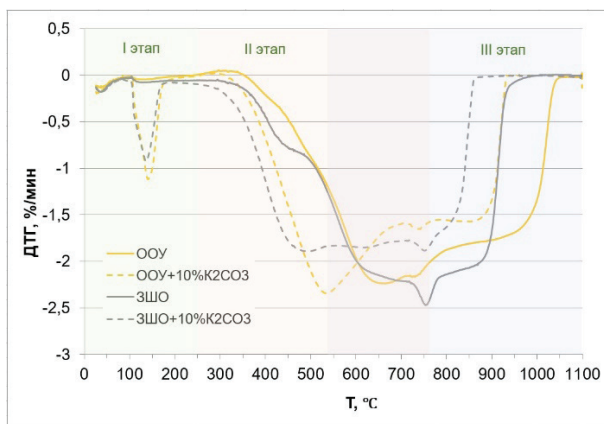


Рис. 5. ДТГ кривые образцов [составлено авторами]
 Fig. 5. DTG curves of the samples [compiled by the authors]

потери массы в более низкий температурный диапазон. Для отходов обогащения угля T_{\max} снижается на 118°C , для золошлаковых отходов — на 280°C , что может свидетельствовать о повышении реакционности фиксированного углерода.

По полученным кривым были рассчитаны параметры процесса горения образцов (табл. 3). T_i и T_b определяли по пересечению касательных кривых ТГ и ДТГ (рис. 6). При добавлении

к отходам карбоната калия происходит смещение процесса окисления углерода в сторону более низкого температурного диапазона. Температура воспламенения ООУ снизилась на 82°C , температура выгорания — на 143°C . Для ЗШО снижение произошло на 110°C и 59°C соответственно.

По данным табл. 3 видно, что при добавлении карбоната калия увеличились C_b на 44.4% , G на 48.1% и S на 61.7% для отходов обогащения угля и C_b на 28.7% ,

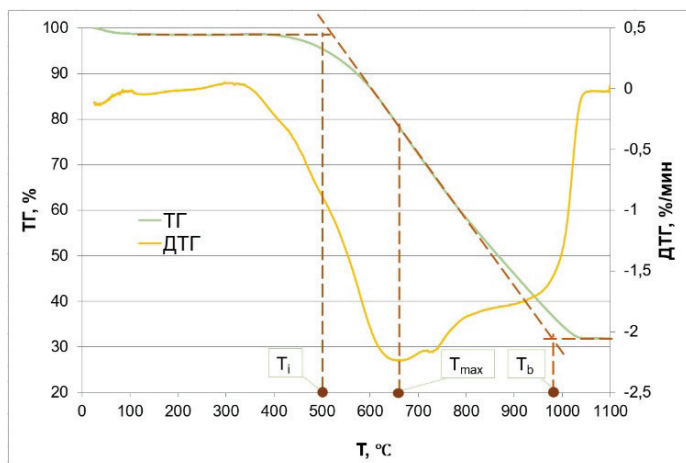


Рис. 6. Определение характеристик горения на примере образца ООУ [составлено авторами]
 Fig. 6. Determination of combustion characteristics using a CPW sample as an example [compiled by the authors]

Таблица 3

Параметры процесса горения отходов и смесей на их основе [составлено авторами]
 Combustion parameters of the wastes and waste-based mixtures [compiled by the authors]

Образец Параметр	ООУ	ООУ + 10% K ₂ CO ₃	ЗШО	ЗШО + 10% K ₂ CO ₃
T _i , °C	517	435	500	390
T _{max} , °C	655	537	765	485
R _{max} , %/мин	2,323	2,374	2,538	1,987
R _{mean} , %/мин	0,709	0,679	0,670	0,649
T _b , °C	985	842	907	848
C _b × 10 ⁻⁶ , %/°C ² × мин	8,69	12,55	10,15	13,06
G × 10 ⁻⁶ , %/°C ² × мин	6,86	10,16	6,64	10,50
S × 10 ⁻⁹ , % ² /C ³ × мин ²	6,26	10,12	7,50	10,00

G на 58.1% и S на 33.3% для золошлаковых отходов, что свидетельствует о снижении температуры воспламенения, ускорении и увеличении интенсивности горения отходов, а также повышении стабильности пламени.

путем построения графиков зависимости $\ln \left[\beta_i \left(\frac{d\alpha}{dT} \right)_{\alpha,i} \right]$ от $1000/T$ при различных скоростях нагрева. Пример представлен на рис. 7.

3.4. Кинетический анализ

Кинетический анализ проводился с использованием метода Фридмана

Энергия активации процесса рассчитывалась по тангенсу угла наклона полученных прямых:

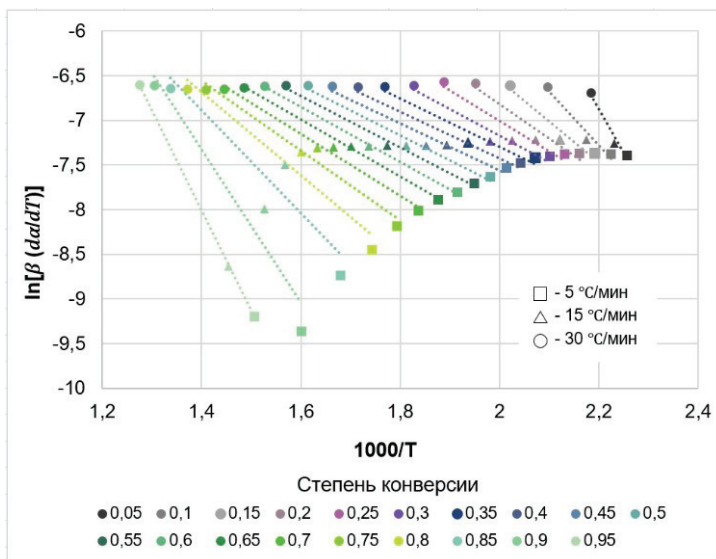


Рис. 7. Графики изоконверсии по методу Фридмана для ЗШО+K₂CO₃ [составлено авторами]
 Fig. 7. Friedman isoconversional plots for ASW+K₂CO₃ [compiled by the authors]

$$E = R \cdot tg(a), \quad (10)$$

где R – универсальная газовая постоянная (Дж/(моль·°С)), $tg(a)$ – равен угловому коэффициенту k в уравнении прямой $y=kx+b$. Коэффициенты детерминации построенных прямых превышают 0,92, что свидетельствует о применимости модели для обработки полученных данных.

После определения значений энергии активации, полученных при каждой скорости нагрева, рассчитывали среднюю энергию активации для отходов и их смесей во всем основном диапазоне термической конверсии (α : 0,05–0,95) (рис. 8).

Профили изменения энергии активации от степени конверсии исходных образцов и образцов с добавкой схожи между собой. Максимальная энергия активации достигалась на первоначальном этапе $\alpha < 0,1$, который соответствует началу процесса выделения и сгорания летучих веществ. При этом значение E у образцов с добавкой ниже по сравнению с изначальными отходами, что свидетельствует о меньшем энергетическом барьере для интенсификации процесса. При увеличении степени конверсии до $\alpha = 0,8$ (ООУ) и $\alpha = 0,6$ (ЗШО) наблюдается постепенное снижение энергии активации, что соответствует протеканию реакции окисления углерода. Дальнейшее увеличение энергии активации может быть связано со снижением содержания углерода в образцах и, как следствие, повышением необходимой энергии для поддержания горения. По полученным зависимостям можно заключить, что добавка карбоната калия снижает энергию активации горения ООУ и ЗШО в диапазоне $\alpha < 0,8$. Кроме того, рас-

считывали среднюю энергию активации для отходов и их смесей во всем основном диапазоне термической конверсии (α : 0,05–0,95) (рис. 8). Профили изменения энергии активации от степени конверсии исходных образцов и образцов с добавкой схожи между собой. Максимальная энергия активации достигалась на первоначальном этапе $\alpha < 0,1$, который соответствует началу процесса выделения и сгорания летучих веществ. При этом значение E у образцов с добавкой ниже по сравнению с изначальными отходами, что свидетельствует о меньшем энергетическом барьере для интенсификации процесса. При увеличении степени конверсии до $\alpha = 0,8$ (ООУ) и $\alpha = 0,6$ (ЗШО) наблюдается постепенное снижение энергии активации, что соответствует протеканию реакции окисления углерода. Дальнейшее увеличение энергии активации может быть связано со снижением содержания углерода в образцах и, как следствие, повышением необходимой энергии для поддержания горения. По полученным зависимостям можно заключить, что добавка карбоната калия снижает энергию активации горения ООУ и ЗШО в диапазоне $\alpha < 0,8$. Кроме того, рас-

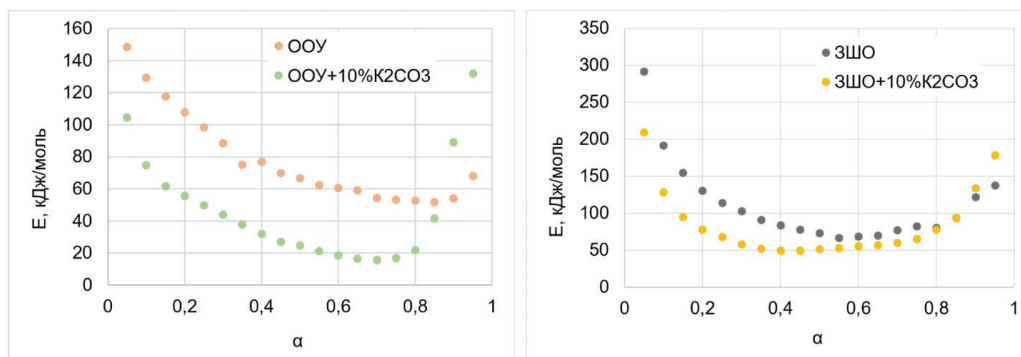


Рис. 8. Зависимость энергии активации от степени конверсии [составлено авторами]
Fig. 8. Dependence of activation energy on the conversion degree [compiled by the authors]

Таблица 4

Энергия активации процесса горения образцов [составлено авторами]
Activation energy of sample combustion [compiled by the authors]

Образец	E , кДж/моль
ООУ	78,6
ООУ + 10% K_2CO_3	46,5
ЗШО	111,3
ЗШО + 10% K_2CO_3	85,1

считывались средние арифметические значения кажущейся энергии активации (табл. 4).

По результатам обработки экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что при добавлении к отходам K_2CO_3 происходит снижение значения энергии активации процесса горения исследуемых отходов, следовательно, добавка имеет каталитическое действие на процесс термодеструкции углесодержащего сырья.

4. Заключение

В ходе экспериментальных исследований по повышению эффективности термической утилизации отходов обогащения угля и золошлаковых отходов было выявлено следующее:

1) исследуемые отходы имеют потенциал для вторичного применения в качестве компонента топлива вследствие большого содержания углерода и высокой удельной теплоты сгорания;

2) повышение эффективности сжигания низкосортного угольного сырья реализуется путем внесения добавок щелочных металлов;

3) эффект достигается за счет окисления низкорреакционного углерода

путем ускорения диффузии кислорода и увеличения пористости материала;

4) карбонат калия имеет больший каталитический эффект по сравнению с карбонатом натрия, оптимальная величина его добавки составляет $10\%_{\text{масс.}}$;

5) добавка K_2CO_3 $10\%_{\text{масс.}}$ к углесодержащим отходам позволяет сместить процесс сжигания в более низкий температурный диапазон, снизить необходимую энергию активации процесса термодеструкции и улучшить характеристики горения.

Результаты исследований указывают на перспективность применения отходов обогащения угля и золошлаковых отходов в качестве сырья на объектах топливно-энергетического комплекса при добавлении K_2CO_3 , источником которого может служить растительная биомасса.

Вклад авторов

Дука А. А. — проведение лабораторных исследований, анализ результатов исследования и подготовка данных, написание текста статьи;

Пашкевич М. А. — концепция исследования, редактирование текста статьи;

Сверчков И. П. — выполнение работы по систематизации материала, редактирование текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кондратьев С. А., Хамзина Т. А.* Повышение качества концентрата во флотационном обогащении низкосортного угля // Записки Горного института. — 2024. — № 265. — С. 65–77.

2. Министерство энергетики Российской Федерации: [сайт]. URL: <https://minenergo.gov.ru/industries/coal/main-indicators/coal-processing-and-enrichment> (дата обращения: 24.04.2024).

3. *Lange I. Yu., Lebedeva Y. A., Kotiukov P. V.* A study of water permeability of coal ash and slag to assess the possibility of their use as road pavement layers // International Journal of Engineering Research and Technology. 2020, vol. 13, no. 2, pp. 374–378. DOI: 10.37624/IJERT/13.2.2020.374–378.

4. *Strizhenok A. V., Bykova M. V., Korotaeva A. E.* Extractive Industries as a Source of Greenhouse Gas Emissions and the Possibility of its Natural Sequestration under the Climatic Conditions of Central and Northern Eurasia // Journal of Ecological Engineering. 2024, vol. 25, no. 5, pp. 43–69. DOI: 10.12911/22998993/185585.

5. *Кутепова Н. А., Мосейкин В. В., Кондакова В. Н., Поспехов Г. Б., Страупник И. А.* Особенности инженерно-геологических свойств отходов углеобогащения в связи с их

складированием // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12. — С. 77–93. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_77.

6. Харьков П. А., Данилов А. С. Оценка эффективности нейтрализации и очистки кислых вод от металлов золой при использовании альтернативного топлива из коммунальных отходов // Записки Горного института. — 2025. — Т. 274. — С. 167–171.

7. Wang Hetang, Cheng Sisi, Wang Haojie, He Jun, Fan Lan, *Danilov A. S.* Synthesis and properties of coal dust suppressant based on microalgae oil extraction // *Fuel*. 2023, vol. 338, article 127273. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127273.

8. Пашкевич М. А., Патокин Д. А., Данилов А. С. Утилизация нитроцеллюлозосодержащих отходов химической промышленности с получением минеральных почвенных добавок // *Экология и промышленность России*. — 2024. — № 28(6). — С. 10–17. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-10-17.

9. Li Hong Wei, Na Zhang, Tian Hua Yang. Effects of Alkaline Earth Metal on Combustion of Pulverized Coal // *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 516–517, pp. 271–275.

10. Tsuyoshi Takuwa, Ichiro Naruse. Detailed kinetic and control of alkali metal compounds during coal combustion // *Fuel Processing Technology*. 2007, vol. 88, pp. 1029–1034. DOI: 10.1016/j.fuproc.2007.06.010.

11. Jingkuan Li, Yun Chen, Yuanyuan Zhang, Jiao Wu, Congxiu Guo, Yan Jin, Yanlin Wang. Effects of alkali and alkaline earth metals on co-combustion of sewage sludge and coal slime: Combustion characteristics, interactions, and kinetics // *Journal of Environmental Management*. 2024, vol. 356. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120735.

12. Shi M., Zhang R., Zhang L., Shi B. Effects of alkali and alkaline earth metal species on the combustion characteristics and synergistic effects: sewage sludge and its blend with coal // *Waste Management*. 2022, vol. 146, pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.05.005.

13. Veraa M. J., Bell A. T. Effect of alkali metal catalysts on gasification of coal char // *Fuel*. 1978, vol. 57, no. 4, pp. 194–200. DOI: 10.1016/0016-2361(78)90116-3.

14. Mingzhe Shi, Rui Zhang, Lijuan Zhang, Bingquan Shi. Effects of alkali and alkaline earth metal species on the combustion characteristics and synergistic effects: Sewage sludge and its blend with coal // *Waste Management*. 2022, vol. 146, pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.05.005.

15. Katherine Le Manquais, Colin Snape, Jim Barker, Ian McRobbie. TGA and Drop Tube Furnace Investigation of Alkali and Alkaline Earth Metal Compounds as Coal Combustion Additive // *Energy & Fuels*. 2012, vol. 26, pp. 1531–1539. DOI: 10.1021/ef201936g.


16. Zhu H., Liao Q., Hu L., Xie L., Qu B., Gao R. Effect of removal of alkali and alkaline earth metals in cornstalk on slagging/fouling and co-combustion characteristics of cornstalk/coal blends for biomass applications // *Renew. Energy*. 2023, vol. 207, pp. 275–285. DOI: 10.1016/j.renene.2023.03.022.

17. Qin Y., He Y., Ren W. Catalytic effect of alkali metal in biomass ash on the gasification of coal char in CO₂ // *J Therm Anal Calorim*. 2020, vol. 39, pp. 3079–3089. DOI: 10.1007/s10973-019-08719-2.

18. Yao X., Zhao Z., Li J., Zhang B., Zhou H., Xu K. Experimental investigation of physicochemical and slagging characteristics of inorganic constituents in ash residues from gasification of different herbaceous biomass // *Energy*. 2020, vol. 198, article 117367. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117367.

19. Han-min Xiao, Xiao-qian Ma, Zhi-yi Lai. Isoconversional kinetic analysis of co-combustion of sewage sludge with straw and coal // *Applied Energy*. 2009, vol. 86, pp. 1741–1745. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.11.016.

20. Peng Ling, Dezhi Chen, Kai Xu, Jun Xu, *Mohamed E. Mostafa*, Long Jiang, Yi Wang, Sheng Su, Song Hu, Jun Xiang. Insight into the synergistic effect on thermal behavior in co-pyrolysis of coal slime and sewage sludge: Kinetics, thermodynamics, dendrite neural network modelling, and evolved char structure // *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 450, article 141790. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141790.

21. Feihong Guo, Zhaoping Zhong. Optimization of the co-combustion of coal and composite biomass pellets // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 185, pp. 399–407. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.064.
22. Chuncai Zhou, Guijian Liu, Xudong Wang, Cuicui Qi. Co-combustion of bituminous coal and biomass fuel blends: Thermochemical characterization, potential utilization and environmental advantage // *Bioresource Technology*. 2016, vol. 218, pp. 418–427. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.06.134.
23. Александрова Т. Н., Кусков В. Б., Афанасова А. В., Кузнецов В. В. Совершенство-вание технологии флотационного обогащения тонких классов коксующихся углей // *Обогащение руд*. — 2021. — № 3. — С. 9–13. DOI: 10.17580/or.2021.03.02.
24. Feihong Guo, Zhaoping Zhong. Experimental studies on combustion of composite biomass pellets in fluidized bed // *Science of The Total Environment*. 2017, vol. 599–600, pp. 926–933. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.026.
25. Biao Fu, Guijian Liu, Md Manik Mian, Chuncai Zhou, Mei Sun, Dun Wu, Yuan Liu. Co-combustion of industrial coal slurry and sewage sludge: Thermochemical and emission behavior of heavy metals // *Chemosphere*. 2019, vol. 233, pp. 440–451. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.256.
26. Родионов В. А., Турсенев С. А., Скрипник И. Л., Ксенофонтов Ю. Г. Результаты исследования кинетических параметров самовозгорания каменноугольной пыли // *Записки Горного института*. — 2020. — Т. 246. — С. 617–622. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.
27. Han-min Xiao, Xiao-qian Ma, Zhi-yi Lai. Isoconversional kinetic analysis of co-combustion of sewage sludge with straw and coal // *Applied Energy*. 2009, vol. 86, pp. 1741–1745. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.11.016.
28. Vyazovkin S., Wight C. A. Kinetics in solids // *Annual Review of Physical Chemistry*. 1997, vol. 48, no. 1, pp. 125–149. DOI: 10.1146/annurev.physchem.48.1.125.
29. Vyazovkin S., Wight C. A. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data // *Thermochimica Acta*. 1999, vol. 340–341, pp. 53–68. DOI: 10.1016/S0040-6031(99)00253-1.
30. Vyazovkin S., Burnham A. K., Criado J. M., Pérez-Maqueda L. A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data // *Thermochimica Acta*. 2011, vol. 520, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.tca.2011.03.034.
31. Петрова Т. А., Епшина А. Д. Антикоррозионная защита трубопроводного транспорта на горно-перерабатывающих предприятиях // *Обогащение руд*. — 2023. — № 6. — С. 52–58. DOI: 10.17580/or.2023.06.09.
32. McKee D. W. Mechanisms of the alkali metal catalysed gasification of carbon // *Fuel*. 1983, vol. 62, no. 2, pp. 170–175. DOI: 10.1016/0016-2361(83)90192-834.
33. Касаткин Н. С., Аленичева А. А., Юрченко Ю. Ю., Таловина И. В. Молибден-медно-порфиновая минерализация перспективного Павловического рудного поля // *Горный журнал*. — 2024. — № 9. — С. 84–90. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.13.
34. Kang Yin, Yu-Ming Zhou, Qing-Zhao Yao, Cheng Fang, Ze-Wu Zhang. Thermogravimetric analysis of the catalytic effect of metallic compounds on the combustion behaviors of coals // *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis* *Reac Kinet Mech Cat*. 2012, vol. 106, no. 2, pp. 369–377. DOI: 10.1007/s11144-012-0444-2.
35. Slovák V., Taraba B. Effect of experimental conditions on parameters derived from TG-DSC measurements of low-temperature oxidation of coal // *J Therm Anal Calorim*. 2010, vol. 101, pp. 641–646. DOI: 10.1007/s10973-010-0878-6. 

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дука Арина Александровна¹ — научный сотрудник, <http://orcid.org/0009-0009-6656-7660>, e-mail: duka_aa@pers.spmi.ru;

Пашкевич Мария Анатольевна¹ — докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой геоэкологии, <http://orcid.org/0000-0001-7020-8219>, e-mail: mpash@spmi.ru;

Сверчков Иван Павлович¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, <http://orcid.org/0000-0003-4725-0050>, e-mail: sverchkov_ip@pers.spmi.ru;

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, Россия.

Для контактов: Дука Арина Александровна, e-mail: duka_aa@pers.spmi.ru.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kondratev S. A., Khamzina T. A. Improvement of concentrate quality in flotation of low-rank coal. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 265, pp. 65–77. [In Russ].

2. Ministry of Energy of the Russian Federation, available at: <https://minenergo.gov.ru/industries/coal/main-indicators/coal-processing-and-enrichment> (accessed 24.04.2024). [In Russ].

3. Lange I. Yu., Lebedeva Y. A., Kotiukov P. V. A study of water permeability of coal ash and slag to assess the possibility of their use as road pavement layers. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020, vol. 13, no. 2, pp. 374–378. DOI: 10.37624/IJERT/13.2.2020.374–378.

4. Strizhenok A. V., Bykova M. V., Korotaeva A. E. Extractive Industries as a Source of Greenhouse Gas Emissions and the Possibility of its Natural Sequestration under the Climatic Conditions of Central and Northern Eurasia. *Journal of Ecological Engineering*. 2024, vol. 25, no. 5, pp. 43–69. DOI: 10.12911/22998993/185585.

5. Kutepova N. A., Moseykin V. V., Kondakova V. N., Posphehov G. B., Straupnik I. A. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, vol. 12, pp. 77–93. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_77.

6. Kharko P. A., Danilov A. S. Evaluation of the effectiveness of neutralization and purification of acidic waters from metals with ash when using alternative fuels from municipal waste. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 274, pp. 167–176.

7. Wang Hetang, Cheng Sisi, Wang Haojie, He Jun, Fan Lan, Danilov A. S. Synthesis and properties of coal dust suppressant based on microalgae oil extraction. *Fuel*. 2023, vol. 338, article 127273. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127273.

8. Pashkevich M. A., Patokin D. A., Danilov A. S. Processing the Nitrocellulose-containing Waste from the Chemical Industry to Obtain Mineral Soil Additives. *Ecology and Industry of Russia*. 2024, vol. 28, pp. 10–17. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-10-17.

9. Li Hong Wei, Na Zhang, Tian Hua Yang. Effects of Alkaline Earth Metal on Combustion of Pulverized Coal. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 516–517, pp. 271–275.

10. Tsuyoshi Takuwa, Ichiro Naruse. Detailed kinetic and control of alkali metal compounds during coal combustion. *Fuel Processing Technology*. 2007, vol. 88, pp. 1029–1034. DOI: 10.1016/j.fuproc.2007.06.010.

11. Jingkuan Li, Yun Chen, Yuanyuan Zhang, Jiao Wu, Congxiu Guo, Yan Jin, Yanlin Wang. Effects of alkali and alkaline earth metals on co-combustion of sewage sludge and coal slime: Combustion characteristics, interactions, and kinetics. *Journal of Environmental Management*. 2024, vol. 356. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120735.

12. Shi M., Zhang R., Zhang L., Shi B. Effects of alkali and alkaline earth metal species on the combustion characteristics and synergistic effects: sewage sludge and its blend with coal. *Waste Management*. 2022, vol. 146, pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.05.005.

13. Veraa M. J., Bell A. T. Effect of alkali metal catalysts on gasification of coal char. *Fuel*. 1978, vol. 57, no. 4, pp. 194–200. DOI: 10.1016/0016-2361(78)90116-3.

14. Mingzhe Shi, Rui Zhang, Lijuan Zhang, Bingquan Shi Effects of alkali and alkaline earth metal species on the combustion characteristics and synergistic effects: Sewage sludge and its blend with coal. *Waste Management*. 2022, vol. 146, pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.05.005.
15. Katherine Le Manquais, Colin Snape, Jim Barker, Ian McRobbie. TGA and Drop Tube Furnace Investigation of Alkali and Alkaline Earth Metal Compounds as Coal Combustion Additive. *Energy & Fuels*. 2012, vol. 26, pp. 1531–1539. DOI: 10.1021/ef201936g.
16. Zhu H., Liao Q., Hu L., Xie L., Qu B., Gao R. Effect of removal of alkali and alkaline earth metals in cornstalk on slagging/fouling and co-combustion characteristics of cornstalk/coal blends for biomass applications. *Renew. Energy*. 2023, vol. 207, pp. 275–285. DOI: 10.1016/j.renene.2023.03.022.
17. Qin Y., He Y., Ren W. Catalytic effect of alkali metal in biomass ash on the gasification of coal char in CO₂. *J Therm Anal Calorim*. 2020, vol. 39, pp. 3079–3089. DOI: 10.1007/s10973-019-08719-2.
18. Yao X., Zhao Z., Li J., Zhang B., Zhou H., Xu K. Experimental investigation of physicochemical and slagging characteristics of inorganic constituents in ash residues from gasification of different herbaceous biomass. *Energy*. 2020, vol. 198, article 117367. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117367.
19. Han-min Xiao, Xiao-qian Ma, Zhi-yi Lai. Isoconversional kinetic analysis of co-combustion of sewage sludge with straw and coal. *Applied Energy*. 2009, vol. 86, pp. 1741–1745. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.11.016.
20. Peng Ling, Dezhi Chen, Kai Xu, Jun Xu, Mohamed E. Mostafa, Long Jiang, Yi Wang, Sheng Su, Song Hu, Jun Xiang. Insight into the synergistic effect on thermal behavior in co-pyrolysis of coal slime and sewage sludge: Kinetics, thermodynamics, dendrite neural network modelling, and evolved char structure. *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 450, article 141790. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141790.
21. Feihong Guo, Zhaoping Zhong. Optimization of the co-combustion of coal and composite biomass pellets. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 185, pp. 399–407. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.064.
22. Chuncai Zhou, Guijian Liu, Xudong Wang, Cuicui Qi. Co-combustion of bituminous coal and biomass fuel blends: Thermochemical characterization, potential utilization and environmental advantage. *Bioresource Technology*. 2016, vol. 218, pp. 418–427. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.06.134.
23. Alexandrova T. N., Kuskov V. B., Afanasova A. V., Kuznetsov V. V. Improvement of the fine coking coal flotation technology. *Obogashchenie Rud*. 2021, vol. 3, pp. 9–13. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.03.02.
24. Feihong Guo, Zhaoping Zhong. Experimental studies on combustion of composite biomass pellets in fluidized bed. *Science of the Total Environment*. 2017, vol. 599–600, pp. 926–933. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.026.
25. Biao Fu, Guijian Liu, Md Manik Mian, Chuncai Zhou, Mei Sun, Dun Wu, Yuan Liu. Co-combustion of industrial coal slurry and sewage sludge: Thermochemical and emission behavior of heavy metals. *Chemosphere*. 2019, vol. 233, pp. 440–451. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.256.
26. Rodionov V. A., Tursenev S. A., Skripnik I. L., Ksenofontov Y. G. Results of the study of kinetic parameters of spontaneous combustion of coal dust. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 617–622. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.
27. Han-min Xiao, Xiao-qian Ma, Zhi-yi Lai. Isoconversional kinetic analysis of co-combustion of sewage sludge with straw and coal. *Applied Energy*. 2009, vol. 86, pp. 1741–1745. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.11.016.
28. Vyazovkin S., Wight C. A. Kinetics in solids. *Annual Review of Physical Chemistry*. 1997, vol. 48, no. 1, pp. 125–149. DOI: 10.1146/annurev.physchem.48.1.125.

29. Vyazovkin S., Wight C.A. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data. *Thermochimica Acta*. 1999, vol. 340–341, pp. 53–68. DOI: 10.1016/S0040–6031(99)00253–1.

30. Vyazovkin S., Burnham A. K., Criado J. M., Pérez-Maqueda L. A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochimica Acta*. 2011, vol. 520, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.tca.2011.03.034.

31. Petrova T. A., Epishina A. D. Anti-corrosion protection of pipelines at mining and processing enterprises. *Obogashchenie Rud*. 2023, vol. 6, pp. 52–58. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2023.06.09.

32. McKee D. W. Mechanisms of the alkali metal catalysed gasification of carbon. *Fuel*. 1983, vol. 62, no. 2, pp. 170–175. DOI: 10.1016/0016–2361(83)90192–834.

33. Kasatkin N. S., Alenicheva A. A., Yurchenko Yu. Yu., Talovina I. V. Molybdenum–copper–porphyry mineralization in the Pavlovich ore field. *Gornyi Zhurnal*. 2024, vol. 9, pp. 84–90. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.13.

34. Kang Yin, Yu-Ming Zhou, Qing-Zhao Yao, Cheng Fang, Ze-Wu Zhang. Thermogravimetric analysis of the catalytic effect of metallic compounds on the combustion behaviors of coals. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis React Kinet Mech Cat*. 2012, vol. 106, no. 2, pp. 369–377. DOI: 10.1007/s11144-012-0444-2.

35. Slovák V., Taraba B. Effect of experimental conditions on parameters derived from TG-DSC measurements of low-temperature oxidation of coal. *J Therm Anal Calorim*. 2010, vol. 101, pp. 641–646. DOI: 10.1007/s10973-010-0878-6.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Duka A. A.*¹, researcher, <http://orcid.org/0009-0009-6656-7660>, 2, Russia, e-mail: duka_aa@pers.spmi.ru;

*Pashkevich M. A.*¹, Dr.Sci., professor, head of department of Geoecology, <http://orcid.org/0000-0001-7020-8219>, e-mail: mpash@spmi.ru;

Sverchkov Ivan Pavlovich — Ph.D., senior researcher, <http://orcid.org/0000-0003-4725-0050>, e-mail: sverchkov_ip@pers.spmi.ru;

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint Petersburg, Vasilievsky Island, 21st Line.

For contacts: *Duka A. A.*, e-mail: duka_aa@pers.spmi.ru.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Получена редакцией 18.06.2025; получена после рецензии 03.10.2025; принята к печати 10.10.2025.

Received by the editors 18.06.2025; received after the review 03.10.2025; accepted for printing 10.10.2025.

