

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА УГЛЕЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

А. И. Докучаева[✉], Б. Н. Пашичев, М. О. Долгова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ ana-anastasia2015@yandex.ru

Аннотация: В работе представлена серия экспериментов на пробах угольной пыли из склонных к самовозгоранию угля пластов. Оценен фракционный состав проб. Определены параметры термического разложения угольной пыли, дающие представления о пожароопасных свойствах угля. Получено, что во всех пробах преобладают частицы крупностью 50-150 мкм. Установлено, что пробам с наибольшим показателем химической активности характерны наименьшие значения температур на всех стадиях термического разложения, а величина прироста массы зависит от фракционного состава. Результаты исследования представляют научно-практический интерес для разработки способа контроля эндогенной пожароопасности экспресс-методом при добыче угля подземным способом.

Ключевые слова: подземная добыча угля, фракция угля, термическое разложение, взрывопожароопасные свойства, эндогенный пожар, термогравиметрический анализ, самовозгорание угля

Благодарности / признательность: Авторы выражают благодарность за ценные советы при проведении исследований д.т.н., г.н.с. Малинниковой Ольге Николаевне, д.т.н., в.н.с. Ульяновой Екатерине Васильевне, к.т.н., с.н.с. Кобылкину Александру Сергеевичу. Особую признательность авторы выражают главному редактору журнала «Маркшейдерия и Недропользование» д.т.н., проф. Дмитраку Юрию Витальевичу и члену редакционной коллегии журнала к.т.н., с.н.с. Федотенко Наталье Александровне.

Для цитирования: Докучаева А. И., Пашичев Б. Н., Долгова М. О. Экспериментальное исследование влияния фракционного состава углей на показатели термического разложения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024;(6):118-124. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_118_124.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF THE FRACTIONAL COMPOSITION OF COALS ON THERMAL DECOMPOSITION PARAMETERS

A. I. Dokuchaeva[✉], B. N. Pashichev, M. O. Dolgova

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ ana-anastasia2015@yandex.ru

Abstract: The paper presents a series of experiments on coal dust samples from coal seams prone to spontaneous combustion. The fractional composition of the samples was estimated. The parameters of thermal decomposition of coal dust have been determined, which give an idea of the fire-hazardous properties of coal. It was found that particles with a size of 50-150 microns predominate in all samples. In the considered sample, it was found that samples with the highest index of chemical activity are characterized by the lowest temperature values at all stages of thermal decomposition, and the amount of mass gain depends on the fractional composition. The results of the study are of scientific and practical interest for the development of a method for controlling endogenous fire hazard by the express method during underground coal mining.

Keywords: underground coal mining, coal fraction, thermal decomposition, explosive and fire-hazardous properties, endogenous fire, thermogravimetric analysis, spontaneous combustion of coal

Acknowledgments: The authors express their gratitude for the valuable advice in conducting research to Olga Nikolaevna Malinnikova, Doctor of Technical Sciences, Chief Scientific; Ulyanova Ekaterina Vasilyevna, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher; Kobytkin Alexander Sergeevich, Ph.D., Senior Researcher. The authors express special gratitude to the editor-in-chief of the journal «Surveying and Subsoil Use» to Dmitrak Yuri Vitalievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, and a member of the editorial board of the journal to Fedotenko Natalia Alexandrovna, Ph.D., Senior Researcher.

For citation: Dokuchaeva A. I., Pashichev B. N., Dolgova M. O. Experimental study of the effect of the fractional composition of coals on thermal decomposition parameters. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(6):118-124. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_118_124.

Введение

При ведении горных работ немаловажным фактором является эндогенная пожароопасность. Пожары, вызванные самопроизвольным возгоранием угля, выделяют большое количество парниковых газов, к примеру, углекислый газ и метан, а также токсичные газы и некоторые микроэлементы из-за сгорания угольного вещества, которые представляют опасность для здоровья человека. Эндогенные пожары способствуют снижению качества добываемого угля, серьезным авариям и травматизму рабочих, а также негативно влияют на экологическую ситуацию в районе разрабатываемого месторождения [1-7].

Проблема борьбы с угольными пожарами актуальна во всех угледобывающих странах. Устранить эндогенный пожар на этапе своевременного обнаружения очага самовозгорания легче, чем в процессе его активности. Для этого необходимо знать механизм самовозгорания угля [8-9].

Действующие в мире методы по отнесению углей к склонным, либо не склонным к самовозгоранию, не являются универсальными. Они дают хорошие результаты лишь в условиях конкретного угольного месторождения. Это усложняет безопасное ведение работ по добычи угля. Зарождающийся эндогенный пожар трудно обнаружить, поскольку он находится под землей. А такие признаки, как повышение температуры в районе очага, обнаружение соответствующих газов и появление задымления — указывают на уже действующий пожар.

Главной причиной самовозгорания угля является его склонность к самовозгоранию, что объясняется химическими реакциями при взаимодействии угля с воздухом [10-12]. Зная научные основы процесса самовозгорания угля можно проследить механизм самовозгорания угля методом термогравиметрического анализа (ТГА). Показатели самовозгорания каменных углей были изучены методом ТГА по приросту массы на стадии окисления и температуре начала прироста массы (T_{ir}), определяемым по ТГ-кривым. Для комплексной оценки свойств образцов угольной пыли были определены температуры самонагрева (T_{sh}), воспламенения (T_{ign}) и температура при наибольшей скорости разложения угля (T_{max}).

Важным свойством угля, влияющим на опасность возгорания шахт, является взрывоопасность угольной пыли. При исследовании детонации и процессов горения угольной пыли установили, что наибольшим максимальным давлением взрыва обладает пыль фракции 63-94 мкм и его концентрация 100 г/м³ [13]. Определение взрывопожароопасных свойств угольной пыли и угля проводят с помощью термических методов анализа, в частности ТГА [14-16]. На показатели термического разложения может влиять фракционный состав анализируемой пробы. Поэтому для сходимости результатов следует проводить анализ пробы в узком диапазоне.

Цель исследований: оценка влияния фракционного состава проб угольной пыли на определяемые показатели термического разложения угля.

Объекты исследования

В качестве объекта исследования были выбраны пробы угольной пыли марок ГЖ, КС и КО, отобранные из шахт «Усковская», «Алардинская» и «Распадская-Коксовая». Места отбора проб — склонные к самовозгоранию угля пласты «6», «50», «III» соответствующих шахт «Алардинская», «Усковская» и «Распадская-Коксовая».

Методы исследования

Определение гранулометрического (фракционного) состава проб проводилось методом лазерной дифракции на приборе Analysette 22. Для термического анализа применялся TGA 701 фирмы Leco. Исследование качественного состава минеральных включений угольной пыли проводилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре ЭКРОС XRF9710 PEARL.

Определение фракционного состава методом лазерной дифракции.

Для определения гранулометрического состава проб гидрофобных материалов, которыми являются исследуемые образцы угольной пыли, применялся ПАВ Dusazin 901. Образцы анализируемой пыли предварительно просеивали через сито 0.315 мм. Пробу с размером частиц менее 0.315 мм отправляли в камеру прибора Analysette 22 фирмы Fritsch [17-18]. Скорость перешипания составляла 3 л/мин. Измерения проводились в диспергирующей среде с добавлением ПАВ при средней скорости перемешивания и мощности ультразвука 60 Вт.

Термогравиметрический анализ (ТГ).

Сущность метода состоит в фиксировании изменения массы образца с ростом температуры. Образец помещается в герметичную камеру, которая со всех сторон обеспечивает равномерный нагрев образцов. Преимуществом прибора TGA 701 Лесо является возможность анализа нескольких образцов за один цикл испытания, что ускоряет процедуру обработки результатов по пробам. Определение ТГ-параметров исследуемых образцов проводят по ТГ-кривым зависимостям изменения массы образца от температуры и ДТГ-кривым, характеризующим скорость изменения массы [19-21]. Эксперимент предполагал нагрев от 24 до 1000 °С с доступом кислорода при скорости нагрева образцов 3 °С/мин. Подаваемый поток кислорода составлял 3,5 л/мин, время анализа — 5 ч 25 мин.

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) проб угольной пыли.

На инициирование и ускорение термических реакций влияют различные минеральные примеси угольного вещества [22-25]. Для оценки состава минеральных включений угольной пыли был проведен рентгенофлуоресцентный анализ. В основе качественного анализа спектров лежит закон Мозли, который описывает зависимость между энергией излучения и атомным номером уравнением:

$$E = 3/4 RyZ^2,$$

где E — энергия излучения, эВ;

Ry — энергия связи электрона в водородоподобном ионе, эВ;

Z — атомный номер.

Идентификация элементов, входящих в состав пробы, проводится по их характеристическим линиям, что позволяет определить элементный состав по расположению линий в спектре. Энергия E и интенсивность I линий в первом приближении не зависят от состава соединения, в который входят анализируемые элементы.

Результаты исследований

Определение фракционного состава каждой пробы проводилось по трем параллельным испытаниям. Графические результаты каждой пробы представлены на рис. 1-3. (См. цв. вклейку на стр. 80)

На рис. 1-3 интегральные кривые ($Q_3(x)$) обозначены красным цветом, дифференциальные гистограммы ($dQ_3(x)$) представлены столбцами синего цвета.

Средний размер частиц (D) в пробах 295, 296 и 297 соответственно составил 78.12 мкм, 101.98 мкм и 86.97 мкм. Содержание мелких фракций в диапазоне от 0.3 до 10 мкм составило 15.62 %, 11.96 % и 16.15 % для проб 295, 296 и 297 марок КС, ГЖ и КО. Около 50 % анализируемой пробы составляют крупные частицы пыли в диапазоне 50-150 мкм.

По ДТГ-кривым (рис. 4-6) можно проследить скорость изменения массы образцов с ростом температуры и определить характерные температуры термического разложения проб.

На рис. 4-6 представлены три параллельных испытания для образцов одних и тех же проб и среднее значение.

На ДТГ-кривых проб 296 и 297 (рис. 5 и 6) на участке температур 200-300 °C присутствуют пики в отличие от пробы 295. Этот пик характеризуется быстрой сменой знака скорости на коротком отрезке времени, что указывает на какую-либо реакцию, протекающую на стадии окисления.

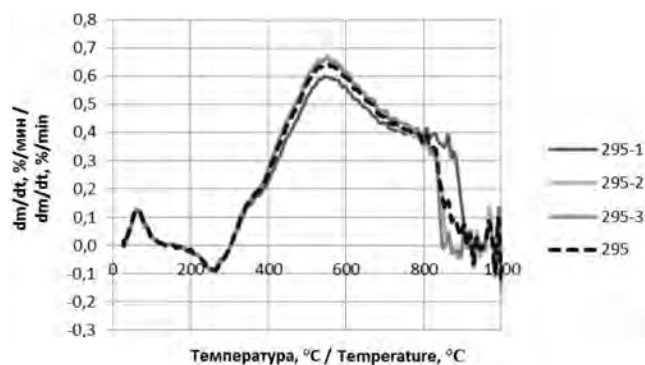


Рис. 4. ДТГ-кривые № 295 / Fig. 4. DTG-curves No. 295

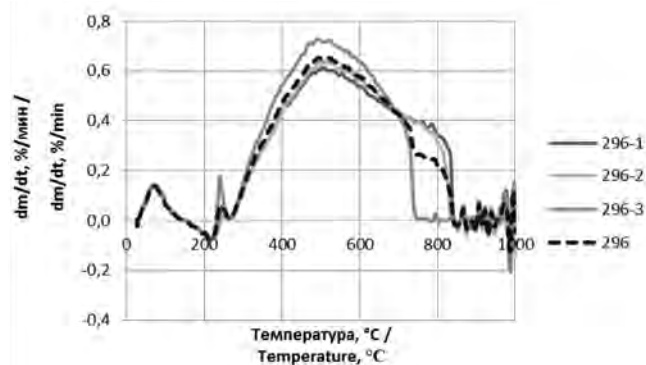


Рис. 5. ДТГ-кривые № 296 / Fig. 5. DTG-curves No. 296

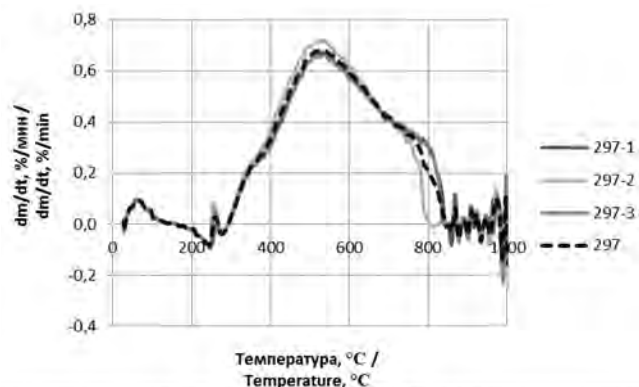


Рис. 6. ДТГ-кривые № 297 / Fig. 6. DTG-curves No. 297

РФА проводился на исходных пробах и на полученных пробах после сжигания (по золе). Результаты представлены на рис. 7-8.

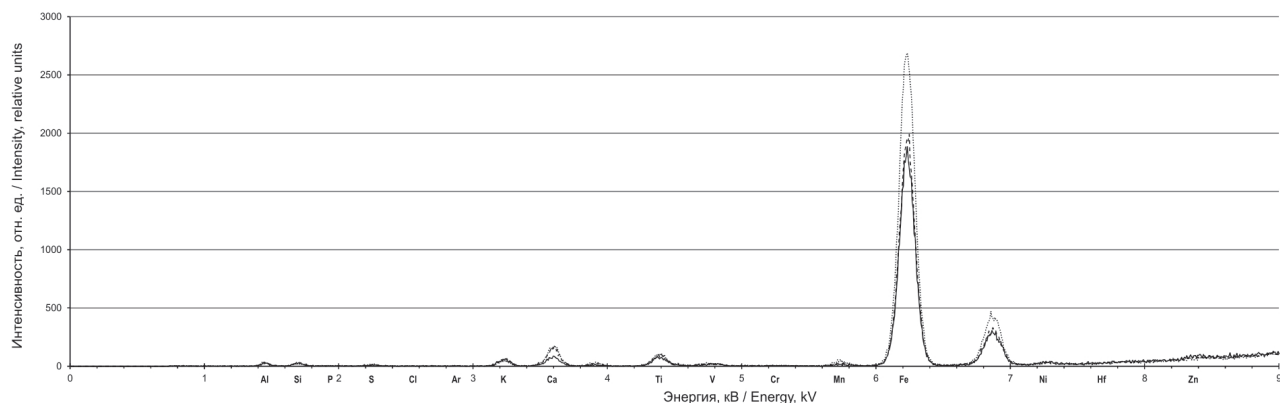


Рис. 7. Рентгенограммы проб / Fig. 7. Radiographs of samples

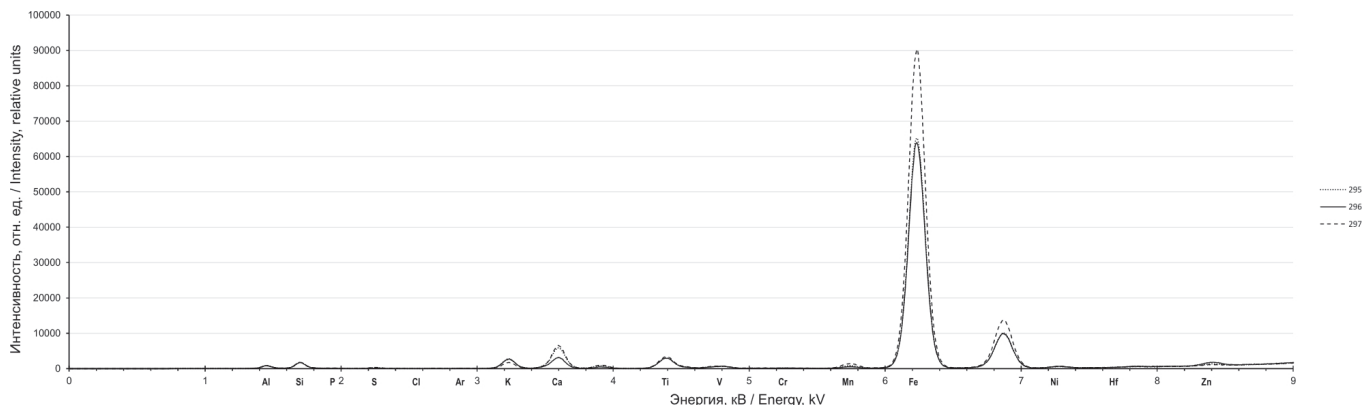


Рис. 8. Рентгенограммы золы проб / Fig. 8. Radiographs of ash samples

Как видно из рис. 7 и 8, интенсивность линий спектров определяемых компонентов выше на образцах после сжигания.

В целом для исходных образцов и образцов золы состав определяемых компонентов аналогичен. А именно, в исследуемых пробах присутствуют такие элементы, как: Fe, Ca, K, Mn, Zn, Al, Si, Ti, S и следы других элементов. Однако на исходных пробах (рис. 7) наибольшая интенсивность отклика по железу у пробы 295 (марка КС), а на рентгенограммах золы этих образцов (рис. 8) наибольших отклик у пробы 297 (марка КО). Для подробной интерпретации результатов необходимо продолжить исследования с определением количественного состава элементов.

Обсуждение результатов исследований

При изучении склонности к самовозгоранию и воспламенению угля важным показателем является величина химической активности угля по поглощению кислорода (U , мл/г·ч).

С помощью ТГА определяется величина максимального прироста массы на стадии окисления (M , %), которая объясняется сорбцией кислорода углем. Величины M и T_{ir} используются как показатели склонности к самовозгоранию в разрабатываемом экспресс-методе оценки эндогенной пожароопасности пластов угля. Поэтому установление взаимосвязи свойств угля и показателей его термического разложения помогут лучше изучить механизм самовозгорания и определить степень влияния изменения конкретных свойств угля на инициирования процесса самонагревания.

После обработки результатов ТГА получены показатели термодеструкции проб (таблица). Согласно данным [26] химическая активность углей исследуемых проб составляет соответственно 0,052; 0,111; 0,055 мл/г·ч. Также в таблице указаны марки угля и средний размер частиц исследуемых проб пыли.

Таблица / Table

Показатели термического разложения проб /
Indicators of thermal decomposition of samples

№ / No.	Марка / Type	D, мкм / D, μm	T_{ir} , °C /	M , % /	T_{sh} , °C /	T_{ign} , °C /	T_{max} , °C /	U , мл/г·ч / U , ml/g·h
295	КС	78.12	157	1.90	236	308	530	0.052
296	ГЖ	101.98	151	1.02	217	238	494	0.111
297	КО	86.97	161	1.04	248	298	527	0.055

По полученным данным (таблица) проба угольной пыли 295 (марка угля КС) обладает наименьшей величиной химической активности, однако относится к весьма склонным к самовозгоранию углям. Характерные значения температур не зависят от среднего размера частиц проб и тем ниже, чем больше значение константы скорости сорбции кислорода (U). Величина максимального прироста массы тем выше, чем меньше средний размер частиц угольной пробы. Таким образом, на показатель M может влиять фракционный состав анализируемой пробы. Рекомендуется проводить исследования проб угольной пыли в узком размерном диапазоне.

Заключение

1. Предложен экспресс-метод контроля свойств углей с применением ТГА, поскольку эндогенные пожары возникают локально как в угольном пласте, добыча которого планируется или ведется, так и в выработанном пространстве.

2. Выявлено, что для локального прогноза самовозгорания необходимо контролировать изменение свойств угольных проб, отобранных из одной точки с определенным интервалом времени.

3. Определены параметры термического разложения угольной пыли, дающие представления о пожароопасных свойствах угля.

4. Получено, что во всех пробах преобладают частицы крупностью 50-150 мкм.

5. В рассмотренной выборке образцов установлено, что пробам с наибольшим показателем химической активности характерны наименьшие значения температур на всех стадиях термического разложения, а величина прироста массы зависит от фракционного состава.

6. Установление взаимосвязи свойств угля и показателей его термического разложения помогут лучше изучить механизм самовозгорания и определить степень влияния изменения конкретных свойств угля на инициирование процесса самонагревания, что в дальнейшем позволит разработать эффективный способ контроля эндогенной пожароопасности экспресс-методом при добыче угля подземным способом.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований термического разложения углей в зависимости от фракционного состава и химической активности углей по поглощению кислорода.

2. Результаты исследования представляют научно-практический интерес для разработки способа контроля эндогенной пожароопасности экспресс-методом при добыче угля подземным способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Греков, С. П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность / С. П. Греков, П. С. Пашковский, В. П. Орликова // Уголь Украины. — 2014. — № 10. — С. 46-50.
- Проблемы и перспективы непрерывного мониторинга пылевых отложений в угольных шахтах / С. И. Голоскоков, Е. И. Голоскоков, М. Ю. Коптев [и др.] // Угледобывающая и экология Кузбасса: Сборник тезисов докладов, Кемерово, 16–18 октября 2017 г. — Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, 2017. — С. 76.
- К вопросу определения групп пожарной опасности угольных шахтопластов / В. Ю. Тарасов, Н. И. Антошенко, Е. С. Руднев, О. А. Левандный // Norwegian Journal of Development of the International Science. — 2020. — № 47-2. — С. 15-26.
- Кравцов, А. А. Опыт применения подземной гидравлической добычи угля в СССР и России / А. А. Кравцов, Ю. В. Дмитрак, В. А. Атрушквич // Маркшейдерия и недропользование. — 2023. — № 3(125). — С. 18-23. — DOI: 10.56195/20793332_2023_3_18_23.
- Некоторые особенности процесса окисления каменных углей в зависимости от влажности воздуха / К. С. Лебедев, С. П. Ворошилов, А. С. Ворошилов, М. С. Сазонов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2010. — № 2. — С. 94-98.
- Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов. — Киев: Наукова думка, 2010. — 424 с.
- Gao, K. Investigation of coupled control of gas accumulation and spontaneous combustion in the goaf of coal mine / K. Gao, Z. Qi, J. Jia [et. al.] // AIP Advances. — 2020. — No. 10 (4). — art. number: 045314. — DOI:10.1063/5.0004243.

8. Heydari, M. Kinetic study and thermal decomposition behavior of lignite coal / M. Heydari, M. Rahman, R. Gupta // *International Journal of Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 4817399. – <https://doi.org/10.1155/2015/4817399>.
9. Nunes, K. G. P. Determination of the kinetic parameters of oxy-fuel combustion of coal with a high ash content / K. G. P. Nunes, N. R. Marcílio // *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 32. – No. 01. – P. 211–223. – DOI: 10.1590/0104-6632.20150321s00003142.
10. Prediction for self-ignition tendency of coal using machine learning / L. Zhang, Z. Song, D. Wu [et. al.] // *Fuel*. – 2022. – Vol. 325. – Article ID 124832. – <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124832>.
11. Marinov, V. N. Self-ignition and mechanisms of interaction of coal with oxygen at low temperatures. 2. Changes in weight and thermal effects on gradual heating of coal in air in the range 20–300 °C / V. N. Marinov // *Fuel*. – 1977. – Vol. 56. – No. 2. – P. 158–164. – DOI: 10.1016/0016-2361(77)90137-5.
12. Gao, Yu. Improved calculation model for the shortest spontaneous combustion period / Yu. Gao, S. Lin, W. Hu // *ACS Omega*. – 2020. – No. 5. – Article ID 23559–23567. – DOI: 10.1021/acsomega.0c01831.
13. Родионов, В. А. Методика исследования процессов горения и детонации каменноугольной пыли в горных выработках / В. А. Родионов, З. А. Абиев, С. Я. Жихарев // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 50–59. – DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.5.
14. ГОСТ Р 53293-2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа. – Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2009, № 69-ст.
15. Термогравиметрический анализ угольной пыли и инертных добавок в системах пылевзрывозащиты / С. Б. Романченко, Е. А. Губина, Д. В. Ушаков, Ю. К. Нагановский // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. – 2020. – № 2. – С. 6–12.
16. Mongush, G. R. Study of combustion characteristics of coals by thermogravimetric analysis and IR-spectroscopy / G. R. Mongush, M. P. Baranova, K. K. Chuldum // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2022. – Vol. 15. – No. 3. – P. 346–355. – DOI: 10.17516/1999-494X-0401.
17. Гольберг, Г. Ю. Гранулометрический состав отходов флотационного обогащения угля и особенности распределения частиц по крупности / Г. Ю. Гольберг, А. Б. Палкин // *ГИАБ*. – 2013. – № 3. – С. 155–158.
18. Разработка методики измерений гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции / В. А. Красилова, С. А. Эпштейн, Е. Л. Коссович [и др.] // *ГИАБ*. – 2022. – № 2. – С. 5–16. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_5.
19. Mohalik, N. K. Application of TG technique to determine spontaneous heating propensity of coals / N. K. Mohalik, E. Lester, I. S. Lowndes // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2020. – Vol. 143 (5). – P. 185–201. – DOI: 10.1007/s10973-019-09237-x.
20. Захаров, В. Н. Адекватность применимости критериев оценки склонности к самовозгоранию углей Печорского и Кузнецкого бассейнов / В. Н. Захаров, А. И. Докучаева, О. Н. Малинникова // *ГИАБ*. – 2023. – № 12. – С. 5–15. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_5.
21. Докучаева, А. И. Особенности газообменных процессов при нагреве в углях, склонных к самовозгоранию / А. И. Докучаева // *Маркшейдерия и недропользование*. – 2023. – № 2(124). – С. 56–61. – DOI: 10.56195/20793332_2023_2_66_61.
22. Исследование каменных углей с использованием рентгеновской томографии / С. П. Ворошилов, В. А. Клименов, Б. И. Капранов [и др.] // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. – 2013. – № 1–2. – С. 5–11.
23. Особенности структуры угля выбросоопасных зон / А. Д. Алексеев, Е. В. Ульянова, В. А. Васильковский [и др.] // *ГИАБ*. – 2010. – № 3. – С. 152–163.
24. Ульянова, Е. В. Влияние неоднородности структуры угля на особенности его термического разложения / Е. В. Ульянова, О. Н. Малинникова, Б. Н. Пашичев // *ГИАБ*. – 2020. – № 2. – С. 71–81.
25. Влияние минеральных составляющих на скорость термического разложения углей / Е. В. Ульянова, О. Н. Малинникова, И. В. Зверев, М. О. Долгова // *Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы XXVII Международной научной школы, Алушта, 18–24 сентября 2017 г. / Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; Институт проблем комплексного освоения недр РАН. – Алушта: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2017. – С. 221–225.*
26. О прогнозной концентрации оксида углерода и водорода при низкотемпературном окислении угля / П. А. Шлапаков, К. С. Лебедев, Т. М. Грачева, С. А. Хаймин // *Вестник НЦ ВостНИИ*. – 2020. – № 2. – С. 32–40.

REFERENCES

1. Grekov SP, Pashkovsky PS, Orlikova VP. Thermal effect of coal oxidation and endogenous fire hazard. *Coal of Ukraine*. 2014;10:46–50 (In Russ.).
2. Goloskokov SI, Goloskokov EI, Koptev MYu, etc. Problems and prospects of continuous monitoring of dust deposits in coal mines. *Collection of abstracts International Russian-Kazakh Symposium «Coal Chemistry and Ecology of Kuzbass»*. 2017:76 (In Russ.).
3. Tarasov VYu, Antoshchenko NI, Rudnev ES, Levadny OA. On the issue of determining fire hazard groups of coal mine layers. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2020;47:15–26.
4. Kravtsov AA, Dmitrak YuV, Atrushkevich VA. The experience of using underground hydraulic coal mining in the USSR and Russia. *Mine Surveying and and Soil Use*. 2023;3(125):18–23. DOI: 10.56195/20793332_2023_3_18_23 (In Russ.).
5. Lebedev KS. Some features of the oxidation process of coal depending on air humidity. *Bulletin of the Scientific Center for safety of work in the coal industry*. 2010;2:94–8 (In Russ.).
6. Alekseev AD. Physics of coal and mining processes. Kiev: Naukova dumka, 2010 (In Russ.).
7. Gao K, Qi Z, Jia J, et. al. Investigation of coupled control of gas accumulation and spontaneous combustion in the goaf of coal mine. *AIP Advances*. 2020;10(4):045314. DOI:10.1063/5.0004243.
8. Heydari M, Rahman M, Gupta R. Kinetic study and thermal decomposition behavior of lignite coal. *International Journal of Chemical Engineering*. 2015;2015:4817399. <https://doi.org/10.1155/2015/4817399>.
9. Nunes KGP, Marcílio NR. Determination of the kinetic parameters of oxy-fuel combustion of coal with a high ash content. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2015;32(01):211–23. DOI: 10.1590/0104-6632.20150321s00003142.
10. Zhang L, Song Z, Wu D, et. al. Prediction for self-ignition tendency of coal using machine learning. *Fuel*. 2022;325:124832. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124832>.
11. Marinov VN. Self-ignition and mechanisms of interaction of coal with oxygen at low temperatures. 2. Changes in weight and thermal effects on gradual heating of coal in air in the range 20–300 °C. *Fuel*. 1977;56(2):158–64. DOI: 10.1016/0016-2361(77)90137-5.
12. Gao Yu, Lin S, Hu W. Improved calculation model for the shortest spontaneous combustion period. *ACS Omega*. 2020;5:23559–23567. DOI: 10.1021/acsomega.0c01831.
13. Rodionov VA, Abiev ZA, Zhikharev SYa. Methodology for studying the processes of gorenje and detonation of coal dust in mining workings. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*. 2018;17(1):50–9. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.5 (In Russ.).

14. GOST R 53293-2009. Fire hazard of substances and materials. Materials, substances and means of fire protection. Identification by thermal analysis methods. // Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, 2009, No. 69-st.
15. Romanchenko SB, Gubina EA, Ushakov DV, Naganovsky YuK. Thermogravimetric analysis of coal dust and inert additives in dust and explosion protection systems. *Bulletin of the Scientific Center for safety of work in the coal industry*. 2020;2:6-12.
16. Mongush GR, Baranova MP, Chuldum KK. Study of combustion characteristics of coals by thermogravimetric analysis and IR-spectroscopy. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2022;15(3):346-55. DOI: 10.17516/1999-494X-0401.
17. Golberg GYu, Palkin AB. Granulometric composition of coal flotation enrichment waste and features of particle size distribution. *MIAB*. 2013;3:155-58 (In Russ.).
18. Krasilova VA, Epstein SA, Kossovich EL. and others. Development of a method for measuring the granulometric composition of coal dust by laser diffraction. *MIAB*. 2022;2:5-16. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_5 (In Russ.).
19. Mohalik NK, Lester E, Lowndes IS. Application of TG technique to determine spontaneous heating propensity of coals. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;143(5):185-201. DOI: 10.1007/s10973-019-09237-x.
20. Zakharov VN, Dokuchaeva AI, Malinnikova ON. Adequacy of the applicability of criteria for assessing the propensity to spontaneous combustion of coals of the Pechora and Kuznetsk basins. *MIAB*. 2023;12:5-15. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_5 (In Russ.).
21. Dokuchaeva AI. Features of gas exchange processes during heating in coals prone to spontaneous combustion. *Mine Surveying and Subsoil Use*. 2023;2(124):56-61. DOI 10.56195/20793332_2023_2_66_61 (In Russ.).
22. Voroshilov SP, Klimenov VA, Kapranov BI, et. al. The study of hard coals using X-ray tomography. *Bulletin of the Scientific center for safety of work in the coal industry*. 2013;1-2:5-11 (In Russ.).
23. Alekseev AD, Ulyanova EV, Vasilkovsky VA, et. al. Features of the structure of coal in hazardous areas. *GIAB*. 2010;3:152-63 (In Russ.).
24. Ulyanova EV, Malinnikova ON, Pashichev BN. The influence of the heterogeneity of the structure of coal on the features of its thermal decomposition. *GIAB*. 2020;2:71-81 (In Russ.).
25. Ulyanova EV, Malinnikova ON, Zverev IV, Dolgova MO. The effect of mineral constituents on the rate of thermal decomposition of coals. Materials of the XXVII International Scientific School named after academician S.A. Khristianovich «Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and workings, 2017, pp. 221-225 (In Russ.).
26. Shlapakov PA, Lebedev KS, Gracheva TM, Khaimin SA. On the predicted concentration of carbon monoxide and hydrogen during low-temperature oxidation of coal. *Bulletin of the National Research Center of the East*. 2020;2:32-40.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Анастасия Игоревна Докучаева –
к.т.н., младший научный сотрудник Центра проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, г. Москва, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3922-5595>, e-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru



Борис Николаевич Пашичев –
младший научный сотрудник Центра проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, г. Москва, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0664-390X>, e-mail: borisnik-pa@yandex.ru



Мария Олеговна Долгова –
ведущий инженер Центра проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, г. Москва, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9886-3952>, e-mail: dol52@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Anastasia I. Dokuchaeva –
Cand. Sci. (Eng.), junior researcher of the center for problems of methane and gas dynamic phenomena of coal and ore deposits, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, 111020, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3922-5595>, e-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru

Boris N. Pashichev –
junior researcher of the Center for problems of methane and gas dynamic phenomena of coal and ore deposits, <https://orcid.org/0000-0002-0664-390X>, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, 111020, Moscow, Russian Federation, e-mail: borisnik-pa@yandex.ru

Maria O. Dolgova –
lead engineer of the Center for problems of methane and gas dynamic phenomena of coal and ore deposits, <https://orcid.org/0000-0001-9886-3952>, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, 111020, Moscow, Russian Federation, e-mail: dol52@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 06.11.2024.

Поступила после рецензирования: 13.12.2024.

Принята к публикации: 19.12.2024.

Article info

Received: 06.11.2024.

Revised: 13.12.2024.

Accepted: 19.12.2024.