

АДЕКВАТНОСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ СКЛОННОСТИ К САМОВОЗГОРАЕМОСТИ УГЛЕЙ ПЕЧОРСКОГО И КУЗНЕЦКОГО БАССЕЙНОВ

В.Н. Захаров¹, А.И. Докучаева¹, О.Н. Малинникова¹

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия,
e-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru

Аннотация: Проведено исследование применимости критериев склонности углей к самовозгоранию, определенных для углей Печорского бассейна, к углям Кузнецкого бассейна. В исследовании применялся предложенный нами метод определения склонности углей к самовозгоранию, основанный на экспериментальных зависимостях изменения массы угля и скорости изменения массы, полученных методом термогравиметрического анализа в температурной области, характерной для процесса окисления и сорбции кислорода. Анализ образцов углей, отобранных из пластов Печорского бассейна, позволил выявить различия в поведении углей, склонных и не склонных к самовозгоранию при нагревании. Исследование углей Кузнецкого месторождения из пластов, склонных к самовозгоранию, показывает, что критерии склонности углей к самовозгоранию (увеличение массы угля при окислении и температура начала реакции сорбции кислорода), полученные методом термогравиметрического анализа, позволяют выявить склонные к самовозгоранию угли, как для Воркутинских, так и для Кузнецких исследованных углей. В качестве дополнительных критериев могут использоваться значения температуры самонагрева и температуры воспламенения угля. Предложенный метод оценки отнесения углей к категории склонных к самовозгоранию отличается от общепринятого в РФ метода своей оперативностью и надежностью определения параметров, необходимых для заключения о самовозгораемости угля. Результаты исследования могут быть полезными для быстрого определения самовозгораемости при добыче, транспортировке и хранении угля, а также при разработке рудных месторождений вблизи угольных пластов при определении районов с высоким риском самовозгорания.

Ключевые слова: самовозгорание угля, термогравиметрический анализ, прирост массы, окисление угля, сорбция кислорода, скорость изменения массы, температура самонагрева, каменный уголь.

Благодарность: Исследования проведены в рамках мероприятия № 1 Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 года № 1144-р, и соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации № 075-15-2022-1185 от 28 сентября 2022 года.

Для цитирования: Захаров В. Н., Докучаева А. И., Малинникова О. Н. Адекватность применимости критериев оценки склонности к самовозгораемости углей Печорского и Кузнецкого бассейнов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12. – С. 5–15. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_5.

Fidelity of evaluation criteria for spontaneous combustion liability of coal from Pechora and Kuznetsk fields

V.N. Zakharov¹, A.I. Dokuchaeva¹, O.N. Malinnikova¹

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru

Abstract: The article investigates whether the evaluation criteria of spontaneous combustion liability determined for the Pechora field coal are applicable to the Kuznetsk field coal. The investigation used the method proposed for determining spontaneous combustion liability of coal based on the experimental relations of coal mass variation and the mass variation rate obtained from the thermogravimetric analysis in the temperature domain intrinsic for the process of oxidation and oxygen sorption. The analysis of the Pechora coal samples reveals some differences in the behavior of coal liable and not liable to spontaneous combustion in heating. The studies of the Kuznetsk field coal liable to spontaneous combustion shows that the criteria of coal liability to spontaneous combustion (increase in coal mass in oxidation and oxygen sorption start temperature), obtained from the thermogravimetric analysis, enable detection of coal liable to spontaneous combustion in the conditions of both Vorkuta and Kuznetsk fields. The additional criteria may be the values of self-heating and inflammation temperatures of coal. The proposed method of coal categorization with respect to spontaneous combustion liability differs from the common method in Russia by operativeness and reliability in determining parameters required for evaluation spontaneous combustion liability of coal. The research findings can be used in the fast determination of spontaneous combustion liability of coal during mining, handling and storage, as well as in the ore mining at a close space from coal seams featuring high risk of spontaneous combustion.

Key words: spontaneous coal combustion, thermogravimetric analysis, mass increase, coal oxidation, oxygen sorption, mass variation rate, self-heating temperature, bituminous coal.

Acknowledgements: The studies were carried out in the framework of Act No. 1 of the Integrated Full-Cycle Innovation R&D Program approved by the Russian Federation Government, Decree No. 1144-r dated 11 May 2022, and were supported in accordance with § 4 of Article 78.1 of the RF Budget Code, Agreement No. 075-15-2022-1185 dated 28 September 2022.

For citation: Zakharov V. N., Dokuchaeva A. I., Malinnikova O. N. Fidelity of evaluation criteria for spontaneous combustion liability of coal from Pechora and Kuznetsk fields. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12):5-15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_5.

Введение

Самовозгорание угля является опасным явлением, создающим угрозу для безопасности ведения горных работ и приводящим к большим материальным потерям. Риски возгорания угля и опасные явления, связанные с этим процессом, необходимо оценивать на разных стадиях угледобычи, перемещения и хра-

нения угля [1]. Самовозгорание угля зависит от двух основных причин: контакта угля с воздухом, приводящего к окислению угольного вещества, и от экзотермической реакции окисления, сопровождающейся выделением тепла [2—5]. При этом для самовозгорания необходимо, чтобы скорость накопления тепла превышала скорость его рассеивания

[2]. Исходя из этих представлений, разработаны лабораторные методы для оценки склонности угля к самовозгоранию, отличающиеся по определяемым показателям [6–13]. Литературный обзор показал, что не существует универсального метода, с помощью которого удалось бы достоверно отнести исследуемый уголь к какой-либо категории опасности по самовозгоранию. Различные методы могут давать хорошие результаты для конкретных месторождений [11].

Методы оценки склонности углей к самовозгоранию можно условно разделить на три группы [3]: определение химического состава, определение активности угля по отношению к окислителям и термические методы.

Исследования химического состава угля и проведение микроскопических исследований позволяют определить структуру и элементный состав угольного вещества и выявить различия в строении склонных и не склонных к самовозгоранию углей [6, 7]. К таким методам относят элементный и технический анализ состава углей, петрографические исследования. Определяемыми параметрами химического анализа угля являются: влажность, летучие, зола, углерод, кислород, сера и минеральные вещества в составе угля и золы [3]. При изучении микроструктуры угля применяют методы сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием и др. [8]. Согласно [11], увеличение содержания влаги, летучих, углерода, азота и водорода и уменьшение содержания золы в углях ускоряют самонагревание, однако этих исследований недостаточно для однозначного определения их склонности к самовозгоранию.

Показателем химической активности угля является кинетическая константа

скорости сорбции, не зависящая от концентрации кислорода в газовой среде [4]. Скорость сорбции кислорода углем определяется по уменьшению концентрации кислорода в сорбционном сосуде. Угли считаются малоопасными по самовозгоранию при $U(25) \leq 0,025 \text{ см}^3/\text{г}\cdot\text{ч}$; опасными — при $0,025 \leq U(25) \leq 0,050$; весьма опасными — при $U(25) \geq 0,050 \text{ см}^3/\text{г}\cdot\text{ч}$. По определенной константе скорости сорбции с учетом свойств угля рассчитывается значение показателя инкубационного периода τ . При $\tau < 50$ сут уголь относят к весьма склонным к самовозгоранию; интервал $50 \leq \tau \leq 80$ характерен для углей, склонных к самовозгоранию; уголь с $\tau > 80$ сут относят к не склонным к самовозгоранию [4]. Определение константы скорости сорбции — весьма длительный и трудоемкий анализ. Воспроизведение показаний скорости сорбции в первые двое суток и в конце анализа затруднено, что влияет на точность и достоверность результата эксперимента.

Термические методы определения склонности углей к самонагреванию и самовозгоранию представляют собой обширную группу. Классический метод, а также модифицированные методы на его основе, заключаются в определении температуры начала быстрого разогрева или воспламенения исследуемого угля под действием кислорода/воздуха [3]. Наиболее распространенные показатели самовозгораемости — СРТ (Crossing Point Temperature [12]) и ХРТ (так называемая «температура перехода» [9]). При помощи дифференциального термического анализа (ДТА), адиабатической и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) определяют показатели Wits-E_{hac}, Wits-CT, FCC, R70 [8], характеризующие склонность угля к самовозгоранию. Показатели СРТ и ХРТ не информативны для образцов с низким содержанием влаги [13].

В Индии, Китае, Польше, Южной Африке и Турции используется метод СРТ. Метод ДТА наибольшей популярностью пользуется в ЮАР и Индии. Калориметрические методы — в Австралии, США и Великобритании. В России склонность угля к самовозгоранию определяют по химической активности угля при поглощении кислорода и продолжительности инкубационного периода самовозгорания угля.

Большинство термических методов дает представление лишь о тепловых свойствах угля, тогда как по изменению массы образцов можно проследить динамику процесса поглощения кислорода воздухом углем, а также судить о явлениях, происходящих в процессе трансформации угольного вещества с ростом температуры. Предложения по применению термогравиметрического метода анализа (ТГА), позволяющего учитывать изменение массы образца угля за счет сорбции кислорода при оценке склонности углей к самовозгоранию, уже отмечались [14], но при попытках использовать метод ТГА для разделения образцов угля по склонности к самовозгоранию по их поведению в зоне высоких температур были получены противоречивые результаты [15]. Поскольку результаты анализа зависят от вводных параметров

и заданного режима исследования образцов угля, критерии определения склонности углей к самовозгоранию методом ТГА до сих пор не установлены.

Материалы и методы исследования

ТГА является перспективным методом для изучения склонности углей к самовозгоранию на низкотемпературной стадии окисления. Термогравиметрические параметры, описывающие поведение образцов угля при нагреве, необходимые для определения показателя склонности углей к самовозгоранию, а также режимы нагрева изучались на протяжении многих лет учеными N.K. Mohalik, E. Lester, C. Avila и B.H. Мариновым [14–18]. На термограммах (рис. 1) в зоне низкотемпературного окисления (150–350 °С) и до температуры воспламенения угля увеличение массы образца интерпретируется как поглощение кислорода углем при разных температурах в зависимости от типа угля [15]. Температуры начала реакции сорбции кислорода образцами ($T_{нач}$), максимального прироста массы (T_M), самонагрева ($T_{нгр}$) и воспламенения ($T_{кр}$) исследуемых образцов определяют по зависимостям изменения массы от температуры (ТГ-кривая) и скорости изменения мас-

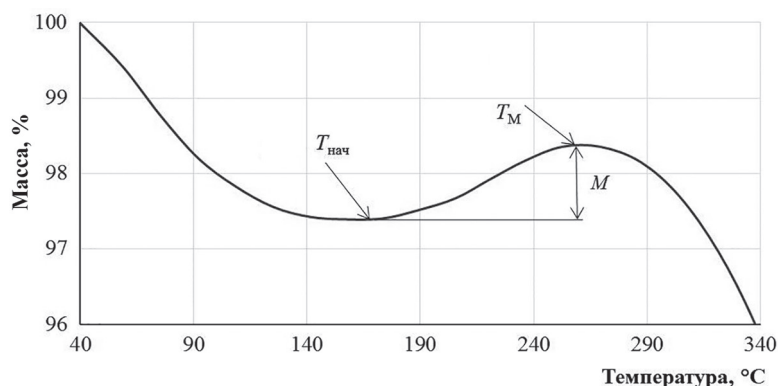


Рис. 1. Прирост массы угля в зоне низкотемпературного окисления

Fig. 1. Weight gain in the low-temperature oxidation zone

сы образцов угля от температуры (ДТГ) [19]. Однако определяемые показатели зависят от скорости нагрева камеры прибора, поэтому для одного и того же образца угля характерны разные значения пиков термограмм при разных скоростях нагрева [17].

При выборе режима нагрева важным фактором является время анализа. В проведенных нами исследованиях [20–22] определены критерии склонности углей к самовозгоранию методом ТГА при скоростях нагрева 3, 5 и 10 °С/мин на углях Печорского каменноугольного месторождения и обоснована конечная температура нагрева до 500 °С вместо 1000 °С, что позволило сократить время анализа [20]. В данной работе приведено определение склонности углей к самовозгоранию некоторых пластов Кузнецкого бассейна по величине максимального прироста массы образца в низкотемпературной зоне окисления, а также по дополнительным критериям: температуре начала процесса сорбции и скорости прироста массы, проводили при 3 и 10 °С/мин.

Работа велась на стандартном термогравиметрическом анализаторе TGA-701 фирмы Лесо. Уголь измельчали до фракции 200 мкм и отбирали навеску массой 1 г. Нагрев проводился до 500 °С с

доступом атмосферного кислорода при скоростях 3 и 10 °С/мин. На термограммах изменение массы фиксировали в процентах от первоначального значения величины навески.

Результаты

Пример участка термограммы, показывающего прирост массы угля при сорбции кислорода, приведен на рис. 1. Температура начала реакции сорбции кислорода образцами ($T_{нач}$) соответствует минимальному значению массы на низкотемпературном участке термограммы, так как в этой точке после завершения процесса испарения влаги начинается увеличение массы образца из-за сорбции кислорода углем. Температура прироста массы (T_M) определяется в точке максимального значения массы, при котором набор массы заканчивается [15]. По этой же кривой определяется и прирост массы образца (M) по разности значений изменения массы в точках, соответствующих температурам T_M и $T_{нач}$ (см. рис. 1).

По ДТГ-кривой (скорости изменения массы образцов угля от температуры) (рис. 2) определяют температуры $T_{нгр}$ в минимуме отрицательной области и $T_{кр}$ по изгибу кривой после нарастания скорости экзотермической реакции, соот-

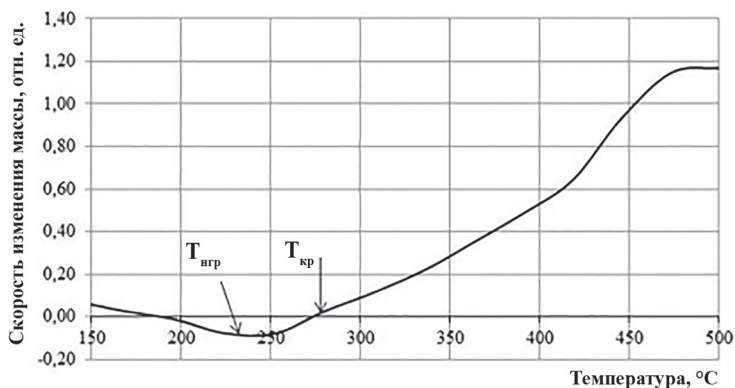


Рис. 2. Скорость изменения массы и характерные температуры $T_{нгр}$ и $T_{кр}$

Fig. 2. Mass change rate and characteristic temperatures T_{sh} and T_{ign}

ветствующей превышению порогового значения температуры самонагрева и переходу угля в состояние возгорания [16].

В результате исследований, проведенных на углях Печорского месторождения, были получены следующие значения: при нагреве камеры ТГА со скоростью 3 °С/мин угли, склонные к самовозгоранию, показали увеличение массы в диапазоне $0,80 \leq M \leq 1,52\%$ и $T_{нач} < 175$ °С. У не склонных к самовозгоранию углей прирост массы $M \leq 0,65\%$ и $T_{нач} \geq 175$ °С.

При нагревании камеры с образцами со скоростью 10 °С/мин увеличение массы углей, склонных к самовозгоранию, было в диапазоне $0,30 \leq M \leq 0,45\%$, а $T_{нач} < 200$ °С и, соответственно, не склонные к самовозгоранию угли показали значения M вблизи нуля и $T_{нач} \geq 200$ °С. Поэтому в качестве критериев склонности углей к самовозгоранию были приняты следующие значения [21].

В режиме нагрева камеры ТГА со скоростью 3 °С/мин:

- угли склонны к самовозгоранию — при $M \geq 0,80\%$ и $T_{нач} < 175$ °С;
- не склонны к самовозгоранию — при $M \leq 0,65\%$ и $T_{нач} \geq 175$ °С.

При нагреве образцов со скоростью 10 °С/мин:

- $M \geq 0,30\%$ и $T_{нач} < 200$ °С для углей, склонных к самовозгоранию;

Таблица 1

Технические характеристики образцов углей Кузнецкого бассейна
Technical characteristics of coal samples from the Kuznetsk basin

№ образца	Место отбора	W, %	A, %	V, %	C, %
К-1	ш. «Талдинская-Западная», пласт 66	2,65	4,31	34,11	58,73
К-2	ш. «Талдинская-Западная», пласт 69	2,60	8,36	33,25	55,78
К-3	ш. Им. А.Д. Рубана, пласт Польшаевский-II, верхняя пачка	3,52	2,32	38,59	55,58
К-4	ш. Им. А.Д. Рубана, пласт Польшаевский-II, нижняя пачка	3,72	1,27	38,46	56,54
К-5	ш. Им. А.Д. Рубана, пласт Польшаевский-II, верхняя пачка	3,01	1,98	41,34	53,68

Примечание: W — влага, A — зола, V — выход летучих веществ, C — углерод.

- M вблизи нуля и $T_{нач} \geq 200$ °С для не склонных к самовозгоранию углей.

Температуры $T_{нгр}$ и $T_{кр}$ показали большой разброс значений при любых скоростях нагрева и были признаны неинформативными как самостоятельные критерии при разделении углей на группы склонных и не склонных к самовозгоранию, кроме того, характерную температуру воспламенения $T_{кр}$ иногда бывает трудно определить. Но в целом, как отмечается рядом исследователей и показали наши исследования, значения этих температур для склонных к самовозгоранию угле ниже, чем для не склонных.

Между группами углей, склонных и не склонных к самовозгоранию, разница средних масс (ΔM) исследованных углей Печорского бассейна составила 0,4% при любых скоростях нагрева образцов углей.

Также нами исследовались каменные угли Кузнецкого бассейна, отобранные из склонных к самовозгоранию пластов 66, 69 шахты «Талдинская-Западная» и пласта Польшаевский-II Шахты им. А.Д. Рубана (табл. 1).

Образцы К-3, К-4 и К-5 подготовлены из проб, отобранных из различных мест пласта Польшаевский-II с глубины 555,9+556,9 м, но уголь К-3 и К-5 — из

Таблица 2

Прирост массы и характерные температуры в зоне низкотемпературного окисления
Weight gain and characteristic temperatures in the low-temperature oxidation zone

№ образца	$T_{нач}(3), ^\circ\text{C}$	$T_M(3), ^\circ\text{C}$	$M(3), \%$	$T_{нач}(10), ^\circ\text{C}$	$T_M(10), ^\circ\text{C}$	$M(10), \%$
К-1	150	225	0,8	181	206	0,09
К-2	133	237	1,3	164	217	0,4
К-3	142	209	0,8	170	197	0,1
К-4	152	211	0,5	180	206	0,1
К-5	138	220	0,7	183	209	0,1

верхней пачки пласта, а К-4 — из нижней. Все образцы имеют близкое содержание углерода, но различаются содержанием летучих и золы. В образцах углей шахты «Талдинская-Западная» содержание золы выше в 2 и 4 раза, чем в углях Шахты им. А.Д. Рубана.

Термогравиметрические показатели M , $T_{нач}$ и T_M углей Кузнецкого бассейна представлены в табл. 2.

При режиме нагрева образцов со скоростью 3 °С/мин (см. табл. 2) образцы К-1 — К-3 следует отнести к склонным к самовозгоранию по термогравиметрическим критериям склонности углей к самовозгоранию [21]. Образец К-4 сложно отнести к какой-либо группе самовозгораемости углей, поскольку прирост массы M этого образца менее 0,65%, что характерно для не склонных к самовозгоранию углей, а значение температуры $T_{нач} < 175$ °С, что свойственно склонным к самовозгоранию в выборке рассмотренных нами углей Печорского бассейна. Прирост массы образца К-5 составляет 0,7% и попадает в диапазон значений 0,65 — 0,80%, который не наблюдался у печорских углей. По критерию $T_{нач}$ К-5 попадает в категорию склонных к самовозгоранию.

При скорости нагрева образцов 10 °С/мин по критерию $M(10)$ только образец К-2 можно отнести к опасным по самовозгораемости, согласно [21]. По величине $T_{нач}$ можно отнести все исследуемые угли к склонным к самовозгоранию.

Значения M , полученные при 10 °С/мин для образцов углей Кузнецкого бассейна, не удовлетворяют критериям склонности к самовозгоранию, определенным для образцов углей Печорского месторождения. Интерпретация термограмм при скорости нагрева 10 °С/мин была затруднена еще и из-за того, что содержала меньшее число точек, по которым строилась термограмма. Это могло повлиять на результаты.

Несмотря на то, что не удалось установить очевидных критериев склонности к самовозгоранию образцов печорских углей по температурам $T_{нгр}$ и $T_{кр}$, для образцов углей Кузнецкого месторождения температуры $T_{нгр}$ и $T_{кр}$ определялись и представлены в табл. 3.

Для уточнения отнесения углей образцов К-4 и К-5 к какой-либо группе самовозгораемости нами рассматривались температуры, приведенные в табл. 3. При нагреве со скоростью 3 °С/мин образцам К-3, К-4 и К-5 соответствуют более низкие температуры $T_{нгр}$ и $T_{кр}$, что свойственно склонным к самовозгоранию углям. Учитывая, что К-3 и К-5 — угли верхней пачки пласта Польшаевский-II и К-3 показал значения, характерные для склонных к самовозгоранию углей, образец К-5 можно отнести к склонным к самовозгоранию. Пробу угля К-4 из нижней пачки пласта Польшаевский-II, несмотря на небольшое значение набора массы M , также следует отнести к склонным к самовозгоранию, поскольку

Таблица 3

Температуры самонагрева $T_{нгр}$ и воспламенения угля $T_{кр}$
Temperatures of self-heating T_{sh} and ignition of coal T_{ign}

№ образца	$T_{нгр}$ (3), °С	$T_{кр}$ (3), °С	$T_{нгр}$ (10), °С	$T_{кр}$ (10), °С
К-1	205	232	206	231
К-2	207	245	217	454
К-3	194	217	197	434
К-4	189	219	206	232
К-5	190	227	209	234

ку значения температур $T_{нач}$ (см. табл. 2), $T_{нгр}$ и $T_{кр}$ (см. табл. 3) свойственны углям, склонным к самовозгоранию [15]. При скорости нагрева 10 °С/мин температуры $T_{нгр}$ и $T_{кр}$ не показательны в выборке кузнецких углей для определения их склонности к самовозгоранию.

Все образцы кузнецких углей показали значения $T_{нач}$, свойственные склонным к самовозгоранию углям, согласно [21], независимо от выбранной скорости нагрева. Однако результаты, полученные при нагреве камеры термогравиметра со скоростью 10 °С/мин, не показательны. В связи с этим рекомендуемая скорость нагрева — 3 °С/мин.

Заключение

Скорость и величину термического эффекта окисления углей при их самовозгорании можно косвенно определить по термогравиметрическим зависимостям. Это позволяет использовать термогравиметрический анализ в качестве ускоренного метода определения склонности углей к самовозгоранию по величине максимального прироста массы угля в низкотемпературной зоне окисления и характерным температурам. По результатам оценки склонности к самовоз-

горанию углей Печорского и Кузнецкого месторождений методом термогравиметрического анализа рекомендован режим медленного нагрева углей со скоростью 3 °С/мин. При исследовании углей Печорского угольного бассейна и установлении критериев разделения углей на склонные и не склонные к самовозгоранию по изменению массы M при нагревании угля и температуре начала реакции сорбции кислорода $T_{нач}$ остался неопределенным интервал значений $0,65 < M < 0,80$ (%). До уточнения определения склонности углей к самовозгоранию в этой области значений необходимо использовать дополнительно значения температур самонагрева $T_{нгр}$ и воспламенения $T_{кр}$. Исследования Кузнецких углей необходимо продолжить для уточнения критериев отнесения углей к различным группам по самовозгораемости. По результатам дополнительных исследований предполагается уточнить критерии, исключив зону неопределенности между диапазоном значений склонных и не склонных к самовозгоранию углей. Возможно, потребуется выделение трех групп углей: угли, не склонные к самовозгоранию, склонные и особо склонные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линденау Н. И., Маевская В. М., Вахрушева Е. С., Дмитриук Н. Ф., Косарь Л. Ф., Воронина К. Е. Каталог углей СССР, склонных к самовозгоранию. — М.: Недра, 1981. — 416 с.

2. Семенов Н. Н. Развитие теории цепных реакций и теплового воспламенения. — М.: Знание, 1969. — 96 с.

3. Mohalik N. K., Lester E., Lowndes I. S. Review of experimental methods to determine spontaneous combustion susceptibility of coal — Indian context // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2017, vol. 31, no. 5, pp. 301 — 332.

4. Веселовский В. С. Физические основы самовозгорания угля и руд. — М.: Наука, 1972. — 148 с.

5. Кизильштейн Л. Я. Геохимия и термохимия углей. — Ростов на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 2006. — 288 с.

6. Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Пашичев Б. Н. Влияние неоднородности структуры угля на особенности его термического разложения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 71 — 81. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-71-81.

7. Zhang Y., Li Y., Huang Y., Li S., Wang W. Characteristics of mass, heat and gaseous products during coal spontaneous combustion using TG/DSC—FTIR technology // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018, vol. 131, pp. 2963 — 2974. DOI: 10.1007/s10973-017-6738-x.

8. Wang X. Laboratory experiment for evaluating characteristics of spontaneous combustion / Spontaneous Combustion of Coal, 2019, pp. 73 — 128. DOI: 10.1007/978-3-030-33691-2_3.

9. Genc B., Cook A. Spontaneous combustion risk in South African coalfields // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015, vol. 115, pp. 563 — 568.

10. Li X., Jin Z., Bai G., Wang J., etc. Experimental study of the influence of water on spontaneous combustion of coal containing pyrite // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2022, vol. 42, no. 5, pp. 288 — 307.

11. Onifade M., Genc B. A review of spontaneous combustion studies — South African context // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2019, vol. 33, no. 8, pp. 527 — 547.

12. Said K. O., Onifade M., Genc B., Lawal A. I., Abdulsalam J. On the dependence of predictive models on experimental dataset: a spontaneous combustion studies scenario // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2021, vol. 35, no. 7, pp. 506 — 522. DOI: 10.1080/17480930.2021.1884336

13. Gbadamosi A. R., Onifade M., Genc B., Rupprecht S. Spontaneous combustion liability indices of coal // Combustion Science and Technology. 2020, vol. 193, no. 15, pp. 2659 — 2671.

14. Avila C., Wu T., Lester E. Estimating the spontaneous combustion potential of coals using thermogravimetric analysis // Energy Fuels. 2014, vol. 28, pp. 1765 — 1773.

15. Mohalik N. K., Lester E., Lowndes I. S. Application of TG technique to determine spontaneous heating propensity of coals // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020, no. 143, pp. 185 — 201.

16. Simon P., Dubaj T., Cibulková Z. Frequent flaws encountered in the manuscripts of kinetic papers // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022, vol. 147, pp. 10083 — 10088.


17. Marinov V. N. Self-ignition and mechanisms of interaction of coal with oxygen at low temperatures. 3. Changes in the composition of coal heated in air at 60 °C // Fuel. 1977, vol. 56, no. 2, pp. 165 — 170.

18. 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 // Fuel. 1977, vol. 56, no. 2, pp. 158 — 164.

19. Epshtein S. A., Kossovich E. L., Kaminskii V. A., Durov N. M., Dobryakova N. N. Solid fossil fuels thermal decomposition features in air and argon // Fuel. 2017, vol. 199, pp. 145 — 156.

20. Докучаева А. И., Малинникова О. Н., Палкин А. Б. Усовершенствованный метод оценки химической активности углей при определении их склонности к самовозгоранию // Химия в интересах устойчивого развития. — 2022. — Т. 30. — № 5. — С. 483 — 487.

21. Докучаева А. И. Особенности газообменных процессов при нагреве в углях, склонных к самовозгоранию // Маркшейдерия и недропользование. — 2023. — № 2 (124). — С. 56–61.

22. Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Докучаева А. И., Пашичев Б. Н. Влияние неоднородности структуры угольного вещества на склонность угля к самовозгоранию // Химия твердого топлива. — 2022. — № 6. — С. 18–24. 

REFERENCES

1. Lindenau N. I., Maevskaya V. M., Vakhrusheva E. S., Dmitryuk N. F., Kosar' L. F., Voronina K. E. *Katalog ugley SSSR, sklonnykh k samovozgoraniyu* [Catalogue of the USSR coals prone to self-ignition], Moscow, Nedra, 1981, 416 p.

2. Semenov N. N. *Razvitie teorii tsepnykh reaktsiy i teplovogo vosplamneniya* [Development of the theory of chain reactions and thermal ignition], Moscow, Znanie, 1969, 96 p.

3. Mohalik N. K., Lester E., Lowndes I. S. Review of experimental methods to determine spontaneous combustion susceptibility of coal — Indian context. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2017, vol. 31, no. 5, pp. 301–332.

4. Veselovskiy V. S. *Fizicheskie osnovy samovozgoraniya uglya i rud* [Physical foundations of self-ignition of coal and ores], Moscow, Nauka, 1972, 148 p.

5. Kizil'shteyn L. Ya. *Geokhimiya i termokhimiya ugley* [Geochemistry and thermochemistry of coals], Rostov na-Donu, Izd-vo Rost. un-ta, 2006, 288 p.

6. Ulyanova E. V., Malinnikova O. N., Pashichev B. N. Influence of structural nonuniformity on features of thermal decomposition in coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 71–81. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-71-81.

7. Zhang Y., Li Y., Huang Y., Li S., Wang W. Characteristics of mass, heat and gaseous products during coal spontaneous combustion using TG/DSC – FTIR technology. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018, vol. 131, pp. 2963–2974. DOI: 10.1007/s10973-017-6738-x.

8. Wang X. Laboratory experiment for evaluating characteristics of spontaneous combustion. *Spontaneous Combustion of Coal*, 2019, pp. 73–128. DOI: 10.1007/978-3-030-33691-2_3

9. Genc B., Cook A. Spontaneous combustion risk in South African coalfields. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015, vol. 115, pp. 563–568.

10. Li X., Jin Z., Bai G., Wang J., etc. Experimental study of the influence of water on spontaneous combustion of coal containing pyrite. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2022, vol. 42, no. 5, pp. 288–307.

11. Onifade M., Genc B. A review of spontaneous combustion studies — South African context. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019, vol. 33, no. 8, pp. 527–547.

12. Said K. O., Onifade M., Genc B., Lawal A. I., Abdulsalam J. On the dependence of predictive models on experimental dataset: a spontaneous combustion studies scenario. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2021, vol. 35, no. 7, pp. 506–522. DOI: 10.1080/17480930.2021.1884336

13. Gbadamosi A. R., Onifade M., Genc B., Rupprecht S. Spontaneous combustion liability indices of coal. *Combustion Science and Technology*. 2020, vol. 193, no. 15, pp. 2659–2671.

14. Avila C., Wu T., Lester E. Estimating the spontaneous combustion potential of coals using thermogravimetric analysis. *Energy Fuels*. 2014, vol. 28, pp. 1765–1773.

15. Mohalik N. K., Lester E., Lowndes I. S. Application of TG technique to determine spontaneous heating propensity of coals. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020, no. 143, pp. 185–201.

16. Simon P., Dubaj T., Cibulková Z. Frequent flaws encountered in the manuscripts of kinetic papers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022, vol. 147, pp. 10083–10088.

17. Marinov V. N. Self-ignition and mechanisms of interaction of coal with oxygen at low temperatures. 3. Changes in the composition of coal heated in air at 60 °C. *Fuel*. 1977, vol. 56, no. 2, pp. 165–170.

18. 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. *Fuel*. 1977, vol. 56, no. 2, pp. 158 – 164.

19. Epshtein S. A., Kossovich E. L., Kaminskii V. A., Durov N. M., Dobryakova N. N. Solid fossil fuels thermal decomposition features in air and argon. *Fuel*. 2017, vol. 199, pp. 145 – 156.

20. Dokuchaeva A. I., Malinnikova O. N., Palkin A. B. An improved method for evaluating the chemical activity of coal in determining its tendency to spontaneous ignition. *Chemistry for sustainable development*. 2022, vol. 30, no. 5, pp. 483 – 487. [In Russ].

21. Dokuchaeva A. I. Features of gas exchange processes during heating in coals prone to spontaneous combustion. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023, no. 2 (124), pp. 56 – 61. [In Russ].

22. Ulyanova E. V., Malinnikova O. N., Dokuchaeva A. I., Pashichev B. N. Effect of structural nonuniformity on spontaneous combustion liability of coal. *Khimia tverdogo topliva*. 2022, no. 6, pp. 18 – 24. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Захаров Валерий Николаевич*¹ – д-р техн. наук,

академик РАН, директор института,

e-mail: val_zakharov@ipkonran.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5056-3296,

*Докучаева Анастасия Игоревна*¹ – младший научный сотрудник,

e-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru,

*Малинникова Ольга Николаевна*¹ – д-р техн. наук,

главный научный сотрудник,

e-mail: olga_malinnikova@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2428-2228,

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

Для контактов: Докучаева А.И., e-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.N. Zakharov*¹, Dr. Sci. (Eng.),

Academician of Russian Academy of Sciences,

Director of the Institute,

e-mail: val_zakharov@ipkonran.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5056-3296,

*A.I. Dokuchaeva*¹, Junior Researcher,

e-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru,

*O.N. Malinnikova*¹, Dr. Sci. (Eng.),

Chief Researcher,

e-mail: olga_malinnikova@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2428-2228,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.I. Dokuchaeva, e-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru.

Получена редакцией 01.10.2023; получена после рецензии 20.10.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 01.10.2023; received after the review 20.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.