

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМОВОЗГОРАНИЯ В ШТАБЕЛЕ УГЛЯ

В.А. Портола¹, А.Н. Жданов², А.А. Бобровникова¹

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
Кемерово, Россия, e-mail: portola2@yandex.ru

² АО «СУЭК-Кузбасс», Ленинск-Кузнецкий, Россия

Аннотация: Климатические особенности Кузбасса приводят к неравномерному использованию угля в течение года, что вызывает необходимость создавать угольные склады в летний период. Постоянный контакт угля с воздухом способствует развитию процесса самовозгорания в штабелях, негативно влияющего на окружающую природную среду и людей из-за выделения вредных веществ, а также приводит к потере полезного ископаемого. Для исследования процесса самовозгорания был сформирован угольный штабель высотой 4 м и объемом около 3000 т. В течение четырех месяцев велось наблюдение за температурой угля, выделяющимися газами в штабеле и химической активностью угля по отношению к кислороду. Замеры показали, что в течение 45 сут наблюдалось снижение температуры штабеля и атмосферного воздуха с одновременным увеличением влажности угля. Затем температура угля начала повышаться с уменьшением его влажности, на поверхности сформировалась температурная аномалия. Температура угля в эпицентре аномалии превышала температуру окружающего воздуха на 25°. Дальнейшее снижение температуры атмосферного воздуха с выпадением снега способствовало охлаждению угля. Из-за поздней закладки штабеля удалось зафиксировать только процесс самонагревания угля. Константа скорости сорбции кислорода углем снижалась в период наблюдений.

Ключевые слова: угольный штабель, процесс самовозгорания, температурные аномалии, очаг самонагревания, константа скорости сорбции кислорода, оксид углерода, выделение газов, температура угля, влажность угля.

Для цитирования: Портола В. А., Жданов А. Н., Бобровникова А. А. Исследование процесса самовозгорания в штабеле угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 155–162. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-155-162.

Spontaneous ignition of coal pile

V.A. Portola¹, A.N. Zhdanov², A.A. Bobrovnikova¹

¹ T. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia, e-mail: portola2@yandex.ru

² SUEK-Kuzbass JSC, Leninsk-Kuznetskiy, Russia

Abstract: Climatic peculiarities of Kuzbass govern nonuniform use of coal in the course of year, which necessitates coal piling on storage yards in summer. Coal being in permanent contact with air promotes spontaneous ignition of coal piles, which affects natural environment and people health due to harmful emissions, and leads to the useful mineral loss. For investigations of spontaneous ignition process, a coal pile was formed with a height of 4 m and volume of round 3000 t. Monitoring of coal pile temperature, gas emissions and chemical activity of coal relative to oxygen was carried out for four months. The measurements showed that the tempe-

rature of the pile and atmospheric air decreased for 45 days with simultaneous increase in the moisture content of coal. Later on, the coal temperatures grew with decreasing moisture content, and a temperature anomaly formed on the pile surface. The coal temperature in the center of the anomaly exceeded the ambient temperature by 25 deg. The further temperature reduction in the atmospheric air with snowfall contributed to cooling of air. Due to late piling, only the process of self-heating was recorded in coal. The kinetic constant of oxygen absorption by coal decreased in the period of observations.

Key words: coal pile, spontaneous ignition process, temperature anomaly, spontaneous heating, kinetic constant of oxygen absorption, carbon oxide, gas emission, coal temperature, coal moisture content.

For citation: Portola V.A., Zhdanov A.N., Bobrovnikova A.A. Spontaneous ignition of coal pile. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(10):155-162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-155-162.

Введение

Разрушение угольных пластов при работе горных предприятий способствует образованию скоплений с резко возросшей площадью поверхности угля, контактирующей с окружающей средой. Образование пор, каналов и трещин в угольном скоплении приводит к формированию процессов тепло- и массообмена между скоплением угля и окружающей средой. В процессе массообмена в атмосферу, окружающую угольное скопление, выделяется метан, образующийся при разрушении угля и в процессе десорбции с поверхности пор, каналов и трещин. Исследованию выделения метана из угля посвящены многочисленные работы [1–4]. На освобождающуюся от метана поверхность сорбируется кислород, поступающий из атмосферы за счет молекулярной диффузии [5] и с потоками воздуха, формируемыми при перепаде давления газов и температурных градиентах. В активных центрах угля происходит взаимодействие кислорода с горючими компонентами, что приводит к образованию таких продуктов окисления, как углекислый газ, оксид углерода, вода.

Окисление горючих компонентов угля сопровождается выделением тепла, что при благоприятных условиях тепло-

обмена с окружающей средой приводит к повышению температуры угольного скопления и развитию процесса самовозгорания [6, 7]. Возникшие эндогенные пожары представляют большую опасность для горных предприятий и окружающей природной среды. Так, очаги самовозгорания могут инициировать взрывы горючих газов и угольной пыли, вызывать отравление людей. Поэтому изучению процесса самовозгорания посвящены многочисленные работы [8–14]. Результаты исследований различных способов борьбы с самовозгоранием угля приведены в работах [15, 16].

Однако в большинстве случаев процессы самовозгорания развиваются в недоступном выработанном пространстве, что затрудняет его изучение. Поэтому основная масса исследований проводится методом математического моделирования или в лабораторных условиях с незначительным количеством угля, что зачастую приводит к противоречивым результатам и не всегда совпадает с результатами наблюдений за реальными очагами самовозгорания в шахтах. Поэтому необходимо проводить наблюдения за развитием процесса самовозгорания угля на промышленных объектах. Наиболее доступными для наблюдения являются угольные штабеля, где созда-

ются условия для окисления угля атмосферным воздухом.

Исследование параметров угля в процессе самовозгорания

Наиболее достоверным исследованием процесса самовозгорания является промышленный эксперимент, позволяющий в реальных масштабах изучить динамику изменения температуры угля. Наличие больших объемов угля дает возможность оценить изменение его химической активности в процессе хранения, его влажность, а также состав выделяющихся из него газов.

Для проведения эксперимента на угольном складе разреза «Камышанский» была выбрана свободная от угля площадка, на которой был сформирован штабель из угля пласта 78, имеющего инкубационный период самовозгорания 50 сут. Площадка предварительно выровнялась, очищалась от мусора и растительности. У подножия штабеля формировались дренажные каналы для отвода дождевых вод. Масса штабеля составила около 3000 т угля, высота достигла 4 м. Углы откоса — не более 25–30°.

Ориентировочные размеры по основанию штабеля 30×35 м, по гребню — 15×20 м (рис. 1).

Планом работ формирование штабеля угля должно быть закончено во второй половине мая. Однако по техническим причинам срок был перенесен, и штабель угля был сформирован только 31 июля. В сентябре температура окружающего воздуха существенно снижается, что увеличивает потери тепла от штабеля. Поэтому вероятность развития эндогенного пожара на контрольном штабеле угля существенно снижалась. Для контроля температуры угля и состава газов в центре штабеля были пробурены две скважины, обсаженные перфорированными трубами длиной 4 м и диаметром 150 мм. Измерение температуры поверхности угольного штабеля проводилось инфракрасным пирометром. Контактный термометр использовался для определения температуры в скважинах на глубине до 4 м и в поверхностном слое скопления угля на глубине 0,5–1,0 м.

Газоанализаторами определялась концентрация оксида углерода, углекисло-

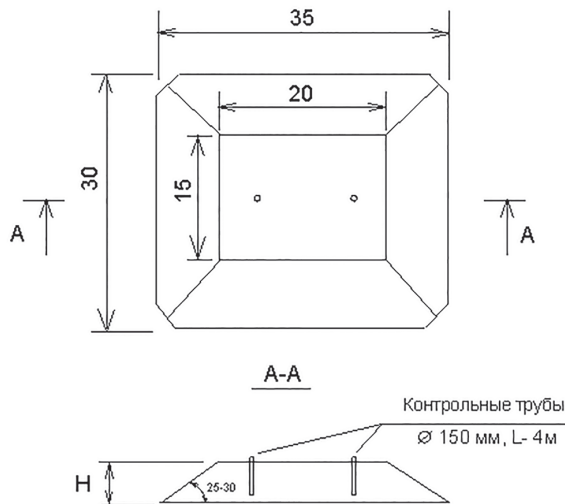


Рис. 1. Схема штабеля угля

Fig. 1. Scheme of coal pile

го газа, кислорода и метана в контрольных трубах и в шпурах на глубине около 0,5 м. Периодически из штабеля также отбирались пробы угля для определения в лабораторных условиях его химической активности. Химическая активность угля оценивалась по величине константы скорости сорбции кислорода углем [7], равной объему кислорода, поглощенного единицей массы угля в единицу времени при концентрации кислорода 100%. Значение константы определялось по формуле [17]

$$U = -\frac{V}{M\tau} \ln \frac{C_A(100 - C_1)}{C_1(100 - C_A)}, \quad (1)$$

где M — масса угля в изолированном объеме, г; V — объем воздуха в сосуде, соприкасающийся с углем, см³; τ — длительность взаимодействия воздуха с углем, ч; C_1 — концентрация кислорода в воздухе до контакта с углем, %; C_A — содержание кислорода в сосуде через время τ контакта с углем, %.

Результаты замера температуры и состава газов в контрольных скважинах угольного штабеля, а также даты замеров приведены в таблице.

Представленные результаты показывают, что в течение первого месяца тепло в штабелях выделялось медленно, и температура угля снижалась по мере падения температуры окружающего воздуха. Так, уже 13 сентября температура воздуха составляла +6 °С, что способствовало увеличению теплоотдачи от штабеля в окружающий воздух и снижению температуры угля. Затем, несмотря на прохладную погоду, наблюдался рост температуры угля в скважинах до 23–24 °С. Однако затем выпал снег, резко похолодало (температура воздуха в ноябре ночью опускалась до –29 °С), и температура угля, измеряемая в контрольных трубах, начала снижаться.

За время наблюдений в скважинах не зафиксировано содержание оксида углерода и метана. Концентрация кислорода всегда была ниже, чем в атмосферном воздухе, что свидетельствовало о его поглощении углем. Содержание углекислого газа в скважинах было выше, чем в атмосферном воздухе. При похолодании из скважин выделялся пар, что указывает на образовании воды при окислении водорода. Однако образу-

Концентрация газов и температура в контрольных скважинах штабеля
Gas concentration and temperature in check boreholes in coal pile

Дата и номер скважины	Состав газов, %				Температура, °С	
	СО	СН ₄	О ₂	СО ₂	угля	воздуха
31.07, № 1,2	0,0000	0,0	20,8	0,04	26	26
22.08, № 1	0,0000	0,0	16,4	1,3	25	24
22.08, № 2	0,0000	0,0	17,1	0,9	22	24
13.09, № 1	0,0000	0,0	17,0	1,1	15	6
13.09, № 2	0,0000	0,0	19,5	0,4	12	6
04.10, № 1	0,0000	0,0	17,5	1,5	21	10,5
04.10, № 2	0,0000	0,0	17,8	0,8	22	10,5
29.10, № 1	0,0000	0,0	20,5	0,10	24,8	4,5
29.10, № 2	0,0000	0,0	20,4	0,14	23,3	4,5
22.11, № 1	0,0000	0,0	18,8	0,72	13,6	–2,5
22.11, № 2	0,0000	0,0	19,3	0,30	10,3	–2,5

щегося при окислении горючих элементов угля тепла не хватало для формирования очагов самовозгорания в штабеле.

Одновременно измерялась температура угля по всей поверхности штабелей на глубине около 0,5–1,0 м. Вначале температура верхнего слоя угля снижалась по мере охлаждения атмосферного воздуха. При этом на верхней кромке штабеля стали выявляться аномалии с повышенной температурой. Так, 04.10 на штабеле сформировалась аномалия с максимальной температурой 18 °С в 2 м от кромки при температуре воздуха 10,5 °С. По мере удаления от кромки штабеля на 2 м температура угля понижалась до 12 °С. Повышенная температура распространялась по штабелю узкой полосой вдоль кромки. Затем, несмотря на дальнейшее снижение температуры окружающего воздуха, начали формироваться аномалии с повышенной температурой. Так, 29.10 на кромке штабеля образовался очаг самонагрева, максимальная температура которого достигла 29,3 °С, диаметр аномалии составлял около 2 м. Однако в конце ноября

из-за резкого похолодания атмосферного воздуха температура в этих аномальных зонах снизилась. 22.11. максимальная температура угля в этой аномалии уменьшилась до 19,8 °С.

Изменение температуры воздуха, а также максимальной температуры очага самонагрева угля исследуемого штабеля приведено на рис. 2.

Полученные результаты показывают, что перепад температуры между очагом самонагрева и окружающим воздухом достигал 25 °С. Затем выпал снег, что снизило приток кислорода к углю и увеличило потери тепла от штабеля. В результате температура угольного штабеля и воздуха начали сближаться.

Одновременно с замерами температуры штабеля были проведены исследования химической активности проб складированного угля. Отобранные в штабелях пробы угля отправлялись в лабораторию для определения сорбционной активности по отношению к кислороду. Вычисление константы скорости сорбции кислорода производилось по формуле (1). Исследование проводи-

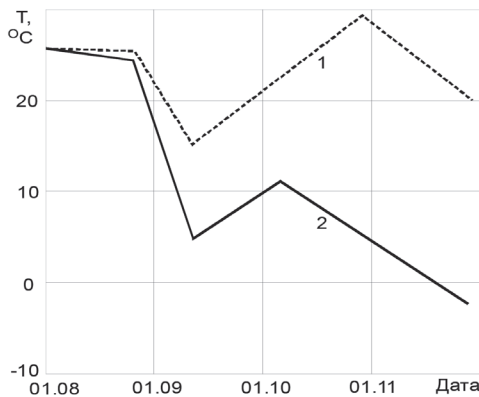


Рис. 2. Изменение температуры атмосферного воздуха и угольного штабеля: 1 – максимальная температура угольного штабеля; 2 – температура атмосферного воздуха

Fig. 2. Variation in temperature of atmospheric air and coal pile: 1 – maximal temperature of coal pile; 2 – temperature of atmospheric air

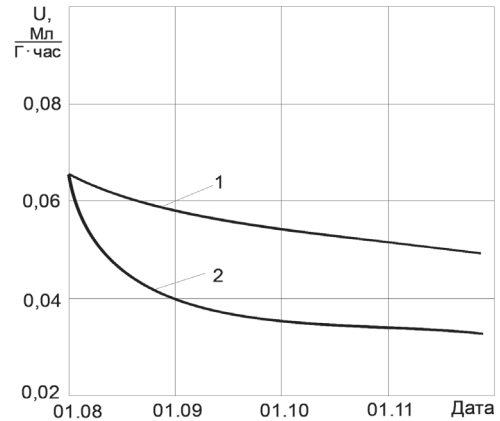


Рис. 3. Изменение константы скорости сорбции кислорода углем штабеля: 1 – на глубине 0,5 м от поверхности штабеля; 2 – на поверхности угольного штабеля

Fig. 3. Change in kinetic constant of oxygen absorption by coal in pile: 1 – at a depth of 0.5 m from pile surface; 2 – on the surface of coal pile

лось при температуре 25 °С в течение 120 ч. В пробах также замерялась влажность и концентрация выделившегося метана. Первый отбор проб проведен сразу после формирования угольного штабеля. Пробы угля отбирались на поверхности штабеля и на глубине 0,5 м. Результаты исследования приведены на рис. 3.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что уголь на поверхности штабеля вначале быстро окисляется, что приводит к снижению константы скорости сорбции кислорода. Причиной может быть образование окисленного слоя на поверхности кусков угля. На глубине этот процесс менее выражен, и скорость сорбции падает незначительно. Затем наблюдается медленное снижение константы скорости сорбции кислорода углем. При оценке результатов исследования необходимо учесть, что в зоне температурной аномалии активность угля может быть больше измеренной, так как этот параметр экспоненциально возрастает при повышении температуры.

Замеры также показали значительные изменения влажности угля в штабеле. На момент закладки штабеля влажность угля составила 10,65%. Затем влажность угля начала возрастать. 22.08 она равнялась 14,00%, а 13.09 достигла 17,84%. Причиной увлажнения могли быть атмосферные осадки, а также образование воды в процессе окисления горючих компонентов угля. Затем влажность угля начала снижаться, что совпало с увеличением температуры угля и образова-

нием очагов самонагревания. Так, 29.10 влажность угля снизилась до 11,42%.

Заключение

Промышленным экспериментом установлено, что в первые два месяца наблюдения изменения температуры угля в штабеле соответствовали колебаниям температуры атмосферного воздуха. Однако за счет окисления угля тепла в штабеле выделялось достаточно для постепенного увеличения градиента между температурой угля и атмосферного воздуха. В течение третьего месяца, несмотря на снижение температуры атмосферного воздуха, у кромки штабеля стал формироваться очаг самонагревания. Температура очага продолжала увеличиваться, и перепад температуры по сравнению с атмосферным воздухом достиг 25°. Последующее похолодание привело к снижению температуры очага самонагревания. Зафиксировано, константа скорости сорбции кислорода углем быстро падает в течение первого месяца хранения в поверхностном слое штабеля. Затем наблюдается медленное снижение активности угля за счет формирования на поверхности кусков угля окисленного слоя. На глубине 0,5 м сорбционная активность угля значительно больше, чем у поверхности штабеля.

Эксперимент показал существенную зависимость процесса возникновения очагов самовозгорания от температуры атмосферного воздуха. Поэтому для исследования возникновения полноценного очага самовозгорания необходимо формировать штабель угля в начале лета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каледина Н. О., Малашкина В. А. Резервы повышения эффективности подземной дегазации угольных пластов с целью улучшения условий труда шахтеров // Горный журнал. — 2017. — № 6. — С. 86—89.
2. Kozyreva E. N., Shinkevich M. V. The peculiarities of structurizing enclosing rock massif while developing a coal seam // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 84. No 1. Article 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012007.

3. Полевщиков Г.Я., Козырева Е.Н., Шинкевич М.В., Леонтьева Е.В. Техногенная структуризация массива горных пород при выемке пласта угля // Горный журнал. — 2017. — № 4. — С. 19–23. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.03.

4. Козырева Е.Н., Непейна Е.С., Шинкевич М.В. Влияние температуры на сорбционную метаноемкость коксующихся углей Кузбасса // Кокс и химия. — 2018. — № 3. — С. 38–42. DOI: 10.3103/S1068364X18030043.

5. Ютяев Е.П., Портола В.А., Мешков А.А., Харитонов И.Л., Жданов А.Н. Развитие процесса самонагрева в скоплениях угля под действием молекулярной диффузии кислорода // Уголь. — 2018. — № 10 (1111). — С. 42–46.

6. Скочинский А.А., Огиевский В.М. Рудничные пожары. — М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. — 375 с.

7. Веселовский В.С., Алексеева Н.Д., Виноградова Л.Н. и др. Самовозгорания промышленных материалов. — М.: Наука, 1964. — 246 с.

8. Portola V.A. Assessment of the effect of some factors on spontaneous coal combustion // Journal of Mining Science. 1996. Vol. 32. No 6. Pp. 536–541.

9. Lin Q., Wang S., Song S., Liang Y., Ren T. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency: velocity range with possibility of self-ignition // Fuel Processing Technology. 2017. Vol. 159. Pp. 38–47.

10. Genc B., Cook A. Spontaneous combustion risk in South African coalfields // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. No 7. Pp. 563–568.

11. Kaymakçi E., Didari V. Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters // Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 2002. Vol. 26. No 1. Pp. 59–64.

12. Beamish B.B., Hamilton G.R. Effect of moisture content on the R70 self-heating rate of Callide coal // International Journal of Coal Geology. 2005. Vol. 64. No 1–2. Pp. 133–138.

13. Onifade M., Genc B. Spontaneous combustion of coals and coal-shales // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Pp. 993–940.

14. Zhang Y., Liu Y., Shi X., Yang C., Wang W., Li Y. Risk evaluation of coal spontaneous combustion on the basis of auto-ignition temperature // Fuel. 2018. Vol. 233. Pp. 68–76.

15. Портола В.А., Жданов А.Н., Бобровникова А.А. Перспектива применения антипирогенов для предотвращения самовозгорания складов угля // Уголь. — 2019. — № 4. — С. 14–19.

16. Пучков Л.А., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Аэродинамический метод предупреждения эндогенной пожароопасности выработанных пространств угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 12. — С. 307–3111.

17. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по определению инкубационного периода самовозгорания угля». Серия 05. Вып. 38. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. — 24 с. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Kaledina N.O., Malashkina V.A. Reserves for improving the efficiency of underground coal bed degassing in order to improve the working conditions of miners. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no 6, pp. 86–89. [In Russ].

2. Kozyreva E.N., Shinkevich M.V. The peculiarities of structurizing enclosing rock massif while developing a coal seam. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 84. No 1. Article 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012007.

3. Polevshchikov G.Ya., Kozyreva E.N., Shinkevich M.V., Leontyeva E.V. Induced structuring of rock mass under coal mining. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no 4, pp. 19–23. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.03.

4. Kozyreva E.N., Nepeina E.S., Shinkevich M.V. Influence of temperature on sorption methane capacity of coking coals of Kuzbass. *Koks i khimiya*. 2018, no 3, pp. 38–42. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068364X18030043.

5. Yutyaev E. P., Portola V.A., Meshkov A.A., Kharitonov I.L., Zhdanov A. N. Development of self-heating process in coal accumulations under the influence of molecular diffusion of oxygen. *Ugol'*. 2018, no 10 (1111), pp. 42 – 46. [In Russ].

6. Skochinskiy A.A., Ogievskiy V.M. *Rudnichnye pozhary* [Mine fires], Moscow, Izd-vo «Gornoe delo» OOO «Kimmeriyskiy tsentr», 2011, 375 p.

7. Veselovskiy V.S., Alekseeva N.D., Vinogradova L.N. *Samovozgoraniya promyshlennykh materialov* [Spontaneous combustion of industrial materials], Moscow, Nauka, 1964, 246 p.

8. Portola V.A. Assessment of the effect of some factors on spontaneous coal combustion. *Journal of Mining Science*. 1996. Vol. 32. No 6. Pp. 536 – 541.

9. Lin Q., Wang S., Song S., Liang Y., Ren T. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency: velocity range with possibility of self-ignition. *Fuel Processing Technology*. 2017. Vol. 159. Pp. 38 – 47.

10. Genc B., Cook A. Spontaneous combustion risk in South African coalfields. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015. Vol. 115. No 7. Pp. 563 – 568.

11. Kaymakçi E., Didari V. Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2002. Vol. 26. No 1. Pp. 59 – 64.

12. Beamish B.B., Hamilton G.R. Effect of moisture content on the R70 self-heating rate of Callide coal. *International Journal of Coal Geology*. 2005. Vol. 64. No 1 – 2. Pp. 133 – 138.

13. Onifade M., Genc B. Spontaneous combustion of coals and coal-shales. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Vol. 28. Pp. 993 – 940.

14. Zhang Y., Liu Y., Shi X., Yang C., Wang W., Li Y. Risk evaluation of coal spontaneous combustion on the basis of auto-ignition temperature. *Fuel*. 2018. Vol. 233. Pp. 68 – 76.

15. Portola V.A., Zhdanov A. N., Bobrovnikova A.A. The prospect of using anti-pyrogens to prevent spontaneous combustion of coal warehouses. *Ugol'*. 2019, no 4, pp. 14 – 19. [In Russ].

16. Puchkov L.A., Kaledina N.O., Kobylkin S.S. The aerodynamic method of prevention of endogenous fire risk of the worked-out areas of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no 12, pp. 307 – 3111. [In Russ].

17. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Instruktsiya po opredeleniyu inkubatsionnogo perioda samovozgoraniya uglja»* [Federal rules and regulations in the field of industrial safety «Instructions for determining the incubation period of spontaneous combustion of coal»], Series 05. Issue 38. Moscow, ZAO NTTS PB, 2013, 24 p. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Портола Вячеслав Алексеевич¹ – д-р техн. наук, профессор, e-mail: portola2@yandex.ru,
Жданов Александр Николаевич – зам. начальника технического управления,
АО «СУЭК-Кузбасс», e-mail: suek-kuzbass@suek.ru,

Бобровникова Алена Александровна¹ – канд. хим. наук, доцент,
e-mail: bobrownickowa.al@yandex.ru,

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева.

Для контактов: Портола В.А., e-mail: portola2@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Portola¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: portola2@yandex.ru,

A.N. Zhdanov, Deputy Head of Technical Department,
SUEK-Kuzbass JSC, 652507, Leninsk-Kuznetskiy, Russia, e-mail: suek-kuzbass@suek.ru,

A.A. Bobrovnikova¹, Cand. Sci. (Chem.), Assistant Professor,

¹ T. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russia.

Corresponding author: V.A. Portola, e-mail: portola2@yandex.ru.

Получена редакцией 18.03.2020; получена после рецензии 20.04.2020; принята к печати 20.09.2020.

Received by the editors 18.03.2020; received after the review 20.04.2020; accepted for printing 20.09.2020.