ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(6—1):187—197
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.822.222 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_187

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ, СПОСОБСТВУЮЩИХ РАЗВИТИЮ ПРОЦЕССА САМОВОЗГОРАНИЯ В ШТАБЕЛЯХ УГЛЯ

В. А. Портола[1], А. Н. Жданов[2], А. А. Бобровникова[1]

[1] Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, 650000, Россия
[2] АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, 652507, Россия

Аннотация: Длительное хранение угля в штабелях угля увеличивает опасность возникновения очагов самовозгорания за счет окисления горючих компонентов кислородом. Уголь, находящийся в штабелях угля, подвергается воздействию различных факторов внешней среды, способных как замедлять, так и ускорять процесс самовозгорания. В наибольшей степени на формирование очагов пожара оказывают температура и влажность воздуха, скорость перемещения и направление воздушных потоков, атмосферные осадки. Проведенные расчеты показали, что под действием ветра на поверхности угольного штабеля создаются зоны с повышенным давлением газа. Избыточное давление газа может достигать100—200 Па и зависит от скорости ветра, его плотности, угла наклона откоса бортов штабеля и угла между вектором скорости ветра и касательной к боковой поверхности. Лабораторные эксперименты показали, что коэффициент проницаемости угольного скопления равен 3,56·10–9 м^2, а снижения проницаемости в 1,25 раза достигается увлажнением скопления угля. Наибольшее количество воздуха, поступающего в угольный штабель, фильтруется вдоль боковой поверхности к горизонтальной поверхности. Максимальная скорость воздуха в скоплении наблюдается по контуру горизонтальной площадки штабеля. Учитывая, что для возникновения очага самовозгорания необходим интенсивный приток воздуха, формирование очага горения будет происходить на бортах штабеля или на его горизонтальной поверхности, на незначительном удалении от борта штабеля.

Ключевые слова: процесс самовозгорания, угольный штабель, ветровой напор, перепад давления газа, фильтрация воздуха, скорость ветра, коэффициент проницаемости, эндогенная пожароопасность, влажность угля.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22—27—20004, https://rscf.ru/project/22—27—20004/

Для цитирования: *Портола В. А., Жданов А. Н., Бобровникова А. А.* Анализ условий, способствующих развитию процесса самовозгорания в штабелях угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6—1. — С. 187—197. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_187.

Analysis of the conditions facilitate to the development of the process of self-carrier-burning in coal stacks

V. A. Portola[1], A. N. Zhdanov[2], A. A. Bobrovnikova[1]

[1] T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russia
[2] JSC "SUEK-Kuzbass", 652507, Leninsk-Kuznetskiy, Russia

© В. А. Портола, А. Н. Жданов, А. А. Бобровникова. 2022

Abstract: Long-term storage of coal in coal piles increases the risk of spontaneous combustion due to the air oxidation of combustible components. The coal stored in coal stacks is exposed to various environmental factors that can both slow down and accelerate the process of spontaneous combustion. Temperature and humidity of the air, speed and direction of air flows, precipitation influence the formation of fire seats to the greatest extent. The calculations have shown that the influence of the wind creates zones with increased gas pressure on the coal stack surface. The excess gas pressure can reach 100–200 Pa and depends on the wind speed, its density, the slope angle of the stack sides and the angle between the wind velocity vector and the tangent to the side surface. Laboratory experiments have shown that the permeability coefficient of a coal accumulation is $3.56 \cdot 10–9$ m^2, and the permeability can be decreased by 1.25 times by moistening the coal accumulation. The largest amount of air entering the coal stack is filtered along the side surface to the horizontal surface. The maximum air velocity in the accumulation is observed along the outline of the stack horizontal location. Considering that spontaneous combustion needs an intensive air inflow, the formation of a fire seat will occur on the stack sides or on its horizontal surface, at a slight distance from the stack side.

Key words: spontaneous combustion process, coal stack, wind pressure, gas pressure drop, air filtration, wind speed, permeability coefficient, endogenous fire hazard, coal moisture.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant № 22–27–20004, https://rscf.ru/project/22–27–20004/

For citation: Portola V. A., Zhdanov A. N., Bobrovnikova A. A. Analysis of the conditions facilitate to the development of the process of self-carrier-burning in coal stacks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–1):187–197. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_187.

Введение

Особенностью угля, осложняющей добычу, хранение и транспортирование полезного ископаемого, является способность окисляться кислородом воздуха при естественной температуре окружающей среды. Тепло, выделяющееся при экзотермической реакции взаимодействия компонентов угля с кислородом, может полностью уходить в окружающую среду, не приводя к повышению температуры. При благоприятных внешних условиях тепла в скоплении угля будет выделяться больше, чем теряется в окружающую среду, что приведет к нагреванию окисляющейся массы и развитию очагов самовозгорания. Эндогенные пожары возникают в шахтах, угольных карьерах, складах для хранения угля [1 – 3]. Зафиксированы очаги самовозгорания перевозимого угля в железнодорожных вагонах и кораблях при длительном транспортировании [4, 5].

Наиболее опасны эндогенные пожары, возникающие в шахтах. Выделяемые в очагах токсические продукты окисления и термического разложения угля распространяются в горных выработках на большие расстояния, угрожая жизни и здоровью шахтеров. Поэтому борьбе с самовозгоранием угля в шахтах посвящены многочисленные исследования [6 – 12]. Так, изучается процесс самовозгорания в отдельных регионах [6], воздействие скорости воздуха на самовозгорание [7], образование газовых аномалий над очагами [8], воздействие геля на уголь [9]. Исследуются особенности самовозгорания угольных сланцев [10], влияние температуры самовоспламенения на процесс самовозгорания [11], применение метода ЭМИ для обнаружения очагов [12]. Разработанные способы локального воздействия на процесс самовозгорания [13 – 15] и применение инертных газов [16 – 19] позволили снизить

количество регистрируемых на угольных шахтах эндогенных пожаров [20]. Очаги самовозгорания, возникающие в угольных скоплениях на земной поверхности, менее опасны для людей, чем подземные пожары, но наносят предприятиям существенный экономический ущерб из-за потерь добытого угля, в большей степени загрязняют окружающую среду токсичными продуктами горения.

Среди поверхностных эндогенных пожаров значительный экономический и экологический ущерб наносят очаги самовозгорания, возникающие в штабелях складируемого угля. Неравномерность потребления угля в летний и зимний периоды приводит к необходимости хранить уголь на складах. Длительный контакт угля с атмосферным воздухом может вызывать развитие процесса самовозгорания. Твердые, жидкие и газообразные продукты термодеструкции и химического взаимодействия компонентов угля с кислородом воздуха загрязняют атмосферу, воду и земную поверхность, угнетая или уничтожая растительный и животный мир. Конвективные потоки газа, возникающие из-за разницы температуры между очагами самовозгорания в скоплении угля и атмосферой, увеличивают вынос пыли из прогретых зон хранимого угля.

Для предотвращения или снижения ущерба, наносимого эндогенными пожарами, возникающими в штабелях угля, необходимо исследовать процессы тепло- и массопереноса, возникающие при самовозгорании скоплений угля, контактирующих с атмосферным воздухом. Необходимо установить все механизмы, способствующие повышению температуры угля и образованию очагов горения. Так, одним из условий развития самовозгорания является приток воздуха в скопление угля, изменяющийся под действием ветра. Результаты исследования можно использовать при разработке способов и средств предупреждения и тушения эндогенных пожаров, возникающих в штабелях угля.

Результаты исследования

Внешние воздействия, которым подвергаются скопления угля, находящиеся в шахте и на земной поверхности, могут существенно отличаться. Так, в шахте температура и относительная влажность воздуха практически не меняется. Перепады давления воздуха, формирующие фильтрационные потоки воздуха в скоплениях угля или в нарушенных целиках полезного ископаемого, также сохраняются на одном уровне длительное время. Уголь, находящийся в штабелях на земной поверхности, подвергается воздействию ветра, направление и величина которого могут быстро меняться. Под действием солнечной радиации может происходить существенный нагрев угля в поверхностном слое.

Значительно может меняться относительная и абсолютная влажность атмосферного воздуха в течение суток. Выпадающие осадки изменяют теплофизические характеристики скопления угля, увеличивая коэффициент теплопроводности и удельную теплоемкость, возрастает и плотность скопления. Выпавшая влага способна изменить также и химическую активность угля по отношению к кислороду. Особенно велики температурные перепады атмосферного воздуха. Суточные и сезонные колебания температуры существенно скажутся на теплообмене угольного скопления с окружающей средой, на количестве тепла, выделяемого при окислении угля.

Одним из параметров, влияющих на возможность и интенсивность разви-

тия процесса самовозгорания угля, является скорость фильтрации воздуха через скопление окисляющегося материала. Проведенные исследования показали, что на начальной стадии развития процесса самовозгорания повышение температуры угольного скопления может происходить только за счет молекулярной диффузии кислорода из атмосферного воздуха [21]. Однако с повышением температуры очага самонагревания возрастает химическая активность и потребность разогретого угля в кислороде. Поэтому необходим приток свежего воздуха в скопление окисляющегося материала под действием перепадов давления газа. Одной из причин принудительной фильтрации воздуха в штабелях угля может быть ветер.

Кинетическая энергия движущегося воздуха при торможении у встречаемой преграды переходит в потенциальную энергию, создавая у поверхности избыточное давление газа. Величина такого избыточного давления воздуха зависит от плотности газа и скорости перемещения воздушного потока. Максимальную величину избыточного давления газа, возникающего у поверхности, тормозящей поток воздуха, можно определить по формуле:

$$H = \frac{v^2 \rho}{2}, \qquad (1)$$

где v — скорость движения потока воздуха, м/с; ρ — плотность движущегося воздуха, кг/м^3.

Величина создаваемого потоком воздуха избыточного давления газа у поверхности, препятствующей движению газа, в зависимости от скорости ветра приведена на рис. 1. Расчет выполнен для воздуха плотностью 1,2 кг/м^3. Такой плотностью обладает сухой воздух при температуре 20 °С.

Реальное значение возникающего избыточного давления может быть

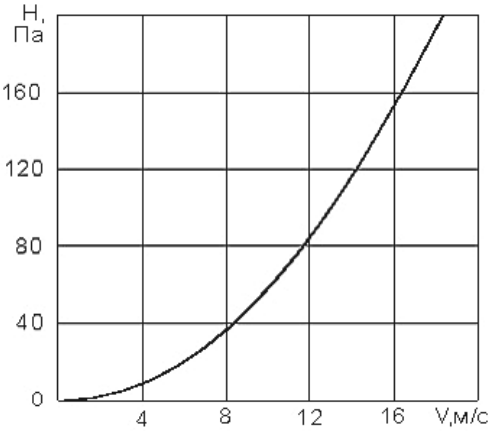

Рис. 1. Изменение величины избыточного давления, создаваемого потоком воздуха при торможении у поверхности преграды, в зависимости от скорости воздуха
Fig. 1. Change in excess pressure value created by the air flow during deceleration at the barrier surface depending on the air velocity

значительно меньше рассчитанного по формуле (1) в случае, когда вектор скорости ветра не является перпендикуляром к поверхности преграды. Так, боковая поверхность угольного штабеля имеет естественные углы откоса, поэтому часть кинетической энергии движущегося воздуха отражается от такой поверхности и уходит с потоком воздуха (рис. 2).

Количество кинетической энергии, уносимой отражаемым потоком и переходящей в избыточное давление, будет зависеть от величины угла откоса боковой поверхности штабеля к поверхности земли в случае, если вектор скорости воздушного потока параллелен поверхности земли. С учетом угла откоса боковой поверхности штабеля угля к земной поверхности, величину избыточного давления воздуха можно определить из выражения:

$$H = \sin\alpha \frac{v^2 \rho}{2}, \qquad (2)$$

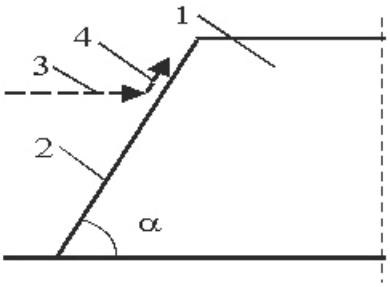

Рис. 2. Снижение ветрового напора на наклонной боковой поверхности угольного штабеля: 1 — угольный штабель; *2* — боковая поверхность штабеля; *3* — вектор скорости воздуха; *4* — отраженная часть потока воздуха

Fig. 2. Reduction of wind pressure on the inclined side surface of the coal stack: 1 — coal stack; *2* — side surface of the stack; *3* — vector air velocity; *4* — the reflected part of the air flow

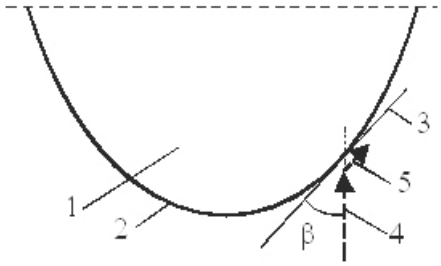

Рис. 3. Снижение ветрового напора за счет закругления штабеля угля: 1 — угольный штабель; *2* — боковая поверхность штабеля; *3* — касательная к поверхности; *4* — вектор скорости воздуха; *5* — отраженная часть потока воздуха

Fig. 3. Reduction of wind pressure due to rounding of the coal stack: 1 — coal stack; *2* — side surface of the stack; *3* — tangent to the surface; *4* — air velocity vector; *5* — the reflected part of the air flow

где α — величина угла откоса боковой поверхности штабеля, градус.

Часть потока воздуха может отражаться и в случае, когда вектор скорости воздуха направлен под углом к касательной боковой поверхности угольного штабеля в горизонтальной плоскости (рис. 3). В этом случае теряемое количество кинетической энергии потока воздуха будет определяться величиной угла между вектором скорости воздушного потока и касательной к боковой поверхности. В общем случае величину избыточного давления воздуха на поверхности угольного штабеля со стороны воздушного потока можно определить по формуле:

$$H = \sin\alpha \sin\beta \frac{v^2 \rho}{2}, \qquad (3)$$

где β — величина угла между вектором скорости и касательной к боковой поверхности угольного штабеля в горизонтальной плоскости, градус.

Возникающее под действием ветрового напора на боковой поверхности избыточное давление газа приведет к формированию потоков воздуха через скопление угля в штабеле. Поступающий с воздухом кислород взаимодействует с горючими элементами угля, а выделяемое тепло способствует повышению температуры скопления. Пути фильтрации и скорость воздуха в скоплении угля будут определяться величиной перепада давления газа и коэффициентом проницаемости скопления угля.

На величину избыточного давления, возникающего на поверхности угольного штабеля, влияют также температура и влажность воздуха. С повышением температуры плотность воздуха уменьшается, снижая и возникающее избыточное давление газа. Увеличение влажности воздуха также приводит к падению плотности и величины избыточного давления газа.

Для измерения коэффициента проницаемости угольного скопления была изготовлена установка, состоящая из камеры, разделенной сеткой на два отделения. Раздробленный уголь помещают в верхнюю камеру на сетку. Подача воздуха в нижнее отделение камеры осуществлялась компрессором.

Поступающий воздух проходит через ротаметр для контроля его расхода. Для замера давления воздуха перед пробой угля использовался манометр, подключенный к камере через штуцер. Затем воздух проходил через пробу угля.

Внутренние размеры камеры равны 200х200 мм. Длина камеры 1200 мм. Масса пробы раздробленного угля, помещаемого в камеру, могла меняться от 30 до 40 кг. В ходе экспериментов рассчитывалась скорость движения воздуха через уголь и коэффициент проницаемости скопления угля при различных расходах подаваемого воздуха. Расход воздуха изменялся в пределах от 1 до 20 *л*/мин.

Скорость воздуха через скопление угля при ламинарном режиме движения зависит от перепада давления газа, коэффициента проницаемости, длины пути фильтрации воздуха и описывается уравнением:

$$v_C = \frac{HK}{\mu L}, \qquad (4)$$

где K — коэффициент проницаемости скопления угля, м^2; H — перепад давления газа в скоплении угля, Па; μ — коэффициент вязкости воздуха, Па·с; L — длина пути фильтрации воздуха через скопление угля, м.

Из выражения (4) можно определить коэффициент проницаемости угольного скопления:

$$K = \frac{v_C \mu L}{H}. \qquad (5)$$

В момент замера относительная влажность воздуха равнялась 61%, температура 22 °С. Масса загружаемого угля составила 31,7 кг. Фракция угля 1—10 мм. Влажность угля составила 3,28%. Коэффициент динамической вязкости воздуха равнялся $18 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Исследования показали, что при расходе воздуха через установку 20 *л*/мин скорость фильтрации газа через скопление угля составила 0,00825 м/с. Перепад давления воздуха, необходимый для фильтрации такого количества воздуха через насыпку, достиг 40 Па. Расчет по формуле (5) показал, что коэффициент проницаемости скопления составил $3{,}56 \cdot 10^{-9}$ м^2. Дальнейшие исследования показали, что часть воздуха фильтровалась вдоль стенок установки. Особенно проницаемой оказались углы квадратной камеры.

На втором этапе исследовалось влияние увлажнения насыпки угля на коэффициент проницаемости. В ходе лабораторного эксперимента установлено, что при подаче на поверхность насыпки угля 0,4 л воды (что составляет 10 *л*/м^2) перепад давления составил около 50 Па при расходе воздуха 20 *л*/мин. В результате такого увлажнения коэффициент проницаемости угольного скопления снизился в 1,25 раза, достигнув значения $2{,}84 \cdot 10^{-9}$ м^2.

Обсуждение результатов исследования

Проведенный анализ показал, что наибольшее избыточное давление газа образуется на боковой поверхности угольного штабеля, касательная к которой перпендикулярна к вектору скорости воздуха. Возникающая у боковой поверхности зона повышенного давления газа приводит к фильтрации воздуха через скопление к поверхностям угольного штабеля, где давление газа меньше. Наиболее коротким путем является движение воздуха к верхней горизонтальной поверхности угольного штабеля (рис. 4).

Скорость фильтрационных потоков воздуха в штабеле угля будет зависеть от скорости ветра, его температуры и влажности, а также от коэффициента проницаемости скопления и расстояния между боковой поверхностью

с избыточным давлением газа до горизонтальной поверхности штабеля. Для расчета скорости фильтрации воздуха в скоплении угля учтено, что средняя скорость ветра в Кузбассе около 4 м/с. Угол откоса боковой поверхности штабеля равен 60 градусов. Результаты расчета скорости фильтрации воздуха в штабеле угля в зависимости от расстояния до верхней горизонтальной площадки, приведены на рис. 5.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что наиболее благоприятными местами для возникновения очагов самовозгорания являются боковая поверхность штабеля и его горизонтальная поверхность, удаленная от борта штабеля на несколько десятков сантиметров. Оптимальная скорость фильтрации воздуха будет зависеть от химической активности угля по отношению к кислороду, существенно возрастающей с повышением температуры. Конкретное место формирование очага будет определяться не только химической активностью угля по отношению к кислороду, но также и величиной скорости фильтрационных потоков газа. При высокой химической активности угля и небольшой скорости фильтрации воздуха кислород будет поглощаться на боковой поверхности штабеля, приводя к повышению температуры угля и формированию очагов самовозгорания. Для разогрева горизонтальной поверхности штабеля кислорода будет недостаточно. Если уголь будет малоактивным по отношению к кислороду, то происходит медленное поглощение кислорода углем на пути фильтрации воздуха. В этом случае быстрее могут разогреваться области штабеля, находящиеся на его горизонтальной поверхности и примыкающие к боковой поверхности.

Скорость фильтрации воздуха через уголь может возрастать за счет тепло-

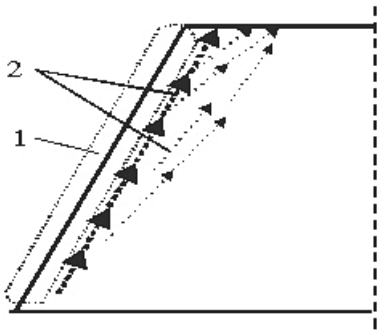

Рис. 4. Фильтрация воздуха в штабеле угля под действием ветрового напора: 1 — зона повышенного давления; 2 — потоки воздуха
Fig. 4. Air filtration in the coal pile under the influence of wind pressure: 1 — high pressure zone; 2 — air flows

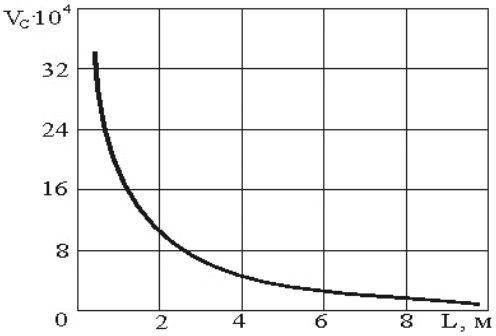

Рис. 5. Изменение скорости фильтрации воздуха в скоплении угля в зависимости от расстояния до поверхности штабеля
Fig. 5. Change in air filtration rate in the coal accumulation depending on the distance to the stack surface

вой депрессии, развиваемой прогретой зоной. Дополнительным механизмом увеличения притока воздуха к разогретому углю будет выгорание угля на пути фильтрации газа, что уменьшит аэродинамическое сопротивление скопления угля. Возникшее пламя будет распространяться по боковой поверхности, где обеспечен оптимальный приток кислорода.

При оценке эндогенной пожароопасности угольных штабелей необходимо учесть, что направление

и скорость ветра могут существенно меняться в течение инкубационного периода, необходимого для развития очага самовозгорания. За счет колебаний параметров атмосферных потоков возможно формирование нескольких очагов пожаров в штабеле угля. Причем во времени они могут развиваться одновременно или последовательно.

Заключение

Проведенными исследованиями установлено, что атмосферные потоки воздуха создают на поверхности угольных штабелей зоны с избыточным давлением газа. Величина избыточного давления воздуха зависит от скорости ветра, плотности воздуха, угла откоса бортов штабеля и угла между вектором скорости ветра и касательной к боковой поверхности. Основное количество фильтрующегося в штабеле воздуха направлено от бортов к горизонтальной поверхности штабеля. Поэтому очаги самовозгорания угля могут формироваться на боковой поверхности, а также горизонтальной поверхности угольного штабеля вблизи от его бортов, в зависимости от химической активности угля по отношению к кислороду и скорости фильтрации воздуха в штабеле. С учетом возможности колебаний направления и скорости ветра в штабеле могут возникать несколько очагов самовозгорания. Увлажнение снижает коэффициент воздухопроницаемости скоплений угля, что уменьшает приток кислорода к окисляющемуся материалу и выделение тепла в штабеле. Одновременно влага замедляет процесс самовозгорания, отнимая тепло на испарение жидкой фазы.

Вклад авторов

Портола Вячеслав Алексеевич — генерация идеи статьи, участие в исследовании, написание статьи.

Жданов Александр Николаевич — постановка задач исследований, выполнение исследований, написание статьи.

Бобровникова Алена Александровна — проведение исследований, анализ результатов работы, оформление результатов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скочинский А. А.*, *Огиевский В. М.* Рудничные пожары. — М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. — 375 с.

2. *Радионов 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.

3. *Рыльникова М. В.*, *Радченко Д. Н.*, *Айнбиндер Г. И.*, *Есина Е. Н.* Оценка взаимосвязи самовозгорания пород с деформационными процессами при комбинированной разработке месторождений колчеданных руд. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 2. — С. 329—341.

4. *Карлов И. Д.*, *Портола В. А.* Профилактика самовозгорания угля, отгружаемого в железнодорожных вагонах. Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах. Материалы X Международной научнопрактической конференции Кемерово, 2013. — С.83—85.

5. *Турсенев С. А.* Пожарная опасность самовозгорания при транспортировке углей морским транспортом. Морской вестник. — 2010. — № 3 (35). — С. 70—72.

6. *Акбаров Т. Г.*, *Исрашлов М. А.*, *Махмудов Д. Р.* Изучение и предупреждение самовозгораемости углей Ангренского месторождения. // Горный информационно-анали-

тический бюллетень (научно-технический журнал). — 2021. — № 1. — С. 170—177. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0—170—177

7. *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. 159. P. 38—47.

8. Portola, V. Detection and location of places of spontaneous combustion of coal in mines due to gas anomalies on the earth's surface // V. Portola, A. Bobrovnikova, G. Shirokolobov, D. Paleev // E3S Web Conf., Vth International Innovative Mining Symposium, 174, 01061 (2020), P. 1—7.

9. *Zhang L.*, *Qin B.* Rheological characteristics of foamed gel for mine fire control. Fire and Materials. 2016. 40 (2). P. 246—260.

10. M. Onifade, B. Genc. Spontaneous combustion of coals and coal-shales. International Journal of Mining Science and Technology. 28 (2018), pp. 993—940

11. *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, 233 (2018), pp. 68—76.

12. *Ерастов А. Ю.*, *Шлапаков Е. А.*, *Хаймин С. А.* Применение метода ЭМИ для контроля эндогенной пожароопасности угольных целиков. // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2017. — № 2. — С. 23—26.

13. *Пучков Л. А.*, *Каледина Н. О.*, *Кобылкин С. С.* Аэродинамический метод предупреждения эндогенной пожароопасности выработанных пространств угольных шахт. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2012. — № 12. — С. 307—311.

14. *Семенова С. А.*, *Патраков Ю. Ф.*, *Майоров А. Е.* Окисление углей в пластах и методы оценки склонности углей к окислению и самовозгоранию (Обзор). // Кокс и химия. — 2020. — № 5. — С. 12—21.

15. *Yuan H.*, *Restuccia F.*, *Richter F.*, *Rein G.* A computational model to simulate self-heating ignition across scales, configurations, and coal origins. Fuel, 236 (2019), pp. 1100—1109

16. *Майоров А. Е.*, *Патраков Ю. Ф.*, *Семенова С. А.*, *Абрамов И. Л.*, *Непеина Е. С.* Обоснование актуальности инъекционной локализации и дезактивации эндогенного самовозгорания. Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2020. — № 6. — С. 324—330.

17. *Син С. А.* Применение азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах // Вестник КузГТУ — 2015. — № 1. — С. 167–171.

18. *Коврижин О. И.*, *Коляда А. Ю.*, *Калиниченко Н. А.* Использование газообразного азота при ликвидации подземных пожаров. Научный вестник НИИГД Респиратор. 2020. — № 5 (57). — С. 37—44.

19. *Deng J.*, Zhao, J.-Y., Zhang, Y.-N., Wang, C.-P., Huang, A.-C., Shu, C.-M. *Thermal behavior and microcharacterization analysis of second-oxidized coal.* Journal of Thermal *Analysis* &amp. 2017. 127 (№1). P. 439—448.

20. *Портола В. А., Овчинников А. Е., Жданов А. Н.* Оценка мер по предупреждению эндогенных пожаров в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 12. — С. 205–214. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12—0-205—214

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

REFERENCES

1. Skochinsky A. A., Ogievsky V. M. Mine fires. Moscow, Publishing house "Mining" LLC "Cimmerian Center", 2011. 375 p. [in Russ.]

2. Radionov V. A., Tursenev S. A., Skripnik I. L., Ksenofontov Yu.G. The results of the study of the kinetic parameters of spontaneous combustion of coal dust. Notes of the Mining Institute. 2020.. 246. P. 617 — 622. [in Russ.]

3. Rylnikova M. V., Radchenko D. N., Ainbinder G. I., Esina E. N. Evaluation of the relationship between spontaneous combustion of rocks and deformation processes in the combined development of pyrite ore deposits. News of the Tula State University. Earth Sciences. 2020. No. 2. P. 329 — 341. [in Russ.]

4. Karlov I. D., Portola V. A. Prevention of spontaneous combustion of coal shipped in railway cars. Life safety of enterprises in industrialized regions. Materials of the X International Scientific and Practical Conference Kemerovo, 2013. P.83 — 85. [in Russ.]

5. Tursenev S. A. Fire hazard of spontaneous combustion when transporting coal by sea. Marine Bulletin. 2010. No. 3 (35). P. 70 — 72. [in Russ.]

6. Akbarov T. G., Israilov M. A., Makhmudov D. R. Study and prevention of self-ignition of coals of the Angren deposit. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2021. No. 1. P. 170 — 177. [in Russ.]

7. 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 Technolo-gy. 2017.159.P. 38 — 47.

8. Portola, V. Detection and location of places of spontaneous combustion of coal in mines due to gas anomalies on the earth's surface. V. Portola, A. Bobrovnikova, G. Shirokolobov, D. Paleev. E3S Web Conf., Vth International Innovative Mining Symposium, 174, 01061 (2020), P. 1 — 7.

9. Zhang L., Qin B. Rheological characteristics of foamed gel for mine fire control. Fire and Materials. 2016.40 (2). P. 246 — 260.

10. M. Onifade, B. Genc. Spontaneous combustion of coals and coal-shales. International Journal of Mining Science and Technology. 28 (2018), pp. 993 — 940

11. 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, 233 (2018), pp. 68 — 76.

12. Erastov A.Yu., Shlapakov E. A., Haymin S. A. Application of the EMP method to control the endogenous fire hazard of coal pillars. Bulletin of the Scientific Center Vost-Research Institute for Industrial and Environmental Safety. 2017. No. 2. P. 23 — 26. [in Russ.]

13. Puchkov L. A., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Aerodynamic method for prevention of endogenous fire hazard in mined-out spaces of coal mines. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2012. No. 12. P. 307 — 311. [in Russ.]

14. Semenova S. A., Patrakov Yu.F., Mayorov A. E. Oxidation of coal in seams and methods for assessing the propensity of coal to oxidation and spontaneous combustion (Review). Coke and chemistry. 2020. No. 5. P. 12 — 21. [in Russ.]

15. Yuan H., Restuccia F., Richter F., Rein G. A computational model to simulate self-heating ignition across scales, configurations, and coal origins. Fuel, 236 (2019), pp. 1100 — 1109

16. Mayorov A. E., Patrakov Yu.F., Semenova S. A., Abramov I. L., Nepeina E. S. Substantiation of the relevance of injection localization and deactivation of endogenous spontaneous combustion. Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources. 2020. No. 6. P. 324 — 330. [in Russ.]

17. Sin S. A. The use of nitrogen to combat spontaneous combustion of coal in mines. Bulletin of KuzGTU. 2015. No. 1. P. 167 — 171. [in Russ.]

18. Kovrizhin O. I., Kolyada A.Yu., Kalinichenko N. A. The use of gaseous nitrogen in the elimination of underground fires. Scientific Bulletin of NIIGD Re-spirator. 2020. No. 5 (57). P. 37 — 44. [in Russ.]

19. Deng J., Zhao, J.-Y., Zhang, Y.-N., Wang, C.-P., Huang, A.-C., Shu, C.-M. *Thermal behavior and microcharacterization analysis of second-oxidized coal.* Journal of Thermal *Analysis* &amp. 2017. 127 (№1). P. 439 — 448.

20. Portola VA, Ovchinnikov AE, Zhdanov AN Evaluation of measures to prevent endogenous fires in coal mines. Mining information and analytical bulletin. 2019. No. 12. P. 205–214. [in Russ.]

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Портола Вячеслав Алексеевич — докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры аэрологии, охраны труда и природы Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, Россия, e-mail: portola2@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-7920-1248;
Жданов Александр Николаевич — заместитель главного инженера (по технологии) — главный технолог ШУ им. А. Д. Рубана, 652507, г. Ленинск-Кузнецкий, ул. Шилина, д. 1, Россия, e-mail: ZhdanovAN@suek.ru, ORCID ID: 0000-0003-2142-6337;
Бобровникова Алена Александровна — канд. хим. наук, доцент, зав. кафедрой обогащения полезных ископаемых КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, Россия, e-mail: baa.htnv@kuzstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-6916-3831.
Для контактов: *Портола Вячеслав Алексеевич*, e-mail: portola2@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Portola V. A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Aerology, Labor and Nature Protection, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, 28 Vesennya St., Russia, e-mail: portola2@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-7920-1248
Zhdanov Aleksandr Nikolaevich, deputy chief engineer (technology) — chief technologist SUEK-Kuzbass JSC Mining department of A. D. Rubana, 652507, Leninsk-Kuzneckij, 1 Shilina St, Russia, e-mail: ZhdanovAN@suek.ru, ORCID ID: 0000-0003-2142-6337
Bobrovnikova Alena Aleksandrovna, Dr. Sci. (Chem.), Associate Professor, theHead of the Department of Mineral Processing, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, 28 Vesennya St., Russia, e-mail: baa.htnv@kuzstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-6916-3831.
Corresponding author: *Portola V. A.*, e-mail: portola2@yandex.ru.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 30.05.2022; принята к печати 10.05.2022.
Received by the editors 14.01.2022; received after the review 30.05.2022; accepted for printing 10.05.2022.