ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(3):133-149
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.807, 622.81 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_133

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ: МЕТОДЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

А.В. Корнев[1], А.А. Спицын[1], Г.И. Коршунов[1], В.А. Баженова[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: spitsyn1998@inbox.ru

Аннотация: Тенденции к увеличению объемов добычи угля подземным способом требуют более пристального внимания к вопросам обеспечения промышленной безопасности и охраны труда. Одними из главных факторов, влияющих на интенсивность ведения горных работ, являются объемы взрывоопасных газов и пыли, выделяющихся в атмосферу ограниченного пространства горных выработок в единицу времени или на тонну горной массы. В XX-XXI веках неоднократно фиксировались взрывы газа и пыли в угольных шахтах Франции, США, Польши, ЮАР, Японии, Китая, Украины, России, суммарные жертвы которых исчисляются несколькими десятками тысяч человек. Приведена статистика крупнейших аварий, представленных взрывами пылеметановоздушных смесей, произошедших на угольных шахтах в мире, охарактеризованы основные причины указанных трагических событий, среди которых стоит выделить несовершенство применяемых противопылевых мероприятий, отклонение от параметров, порядка и периодичности их проведения, отсутствие надлежащего производственного контроля. Проанализированы современные методы и подходы к предупреждению и локализации взрывов угольной пыли, обозначены их «слабые» места. Предложены некоторые технические решения, которые могут быть интересны при их должном научно-техническом обосновании, с точки зрения практической реализации, так как по мнению авторов, их использование позволит улучшить пылевую обстановку в подземных горных выработках и снизить вероятность взрывов с участием угольной пыли.

Ключевые слова: пылевзрывобезопасность подземных горных выработок, угольная пыль, взрывы газа и пыли, интенсивность пылеотложения, осланцевание, гидропылевзрывозащита, гидрогель, контроль качества осланцевания и интенсивности пылеотложения.

Для цитирования: *Корнев А. В., Спицын А. А., Коршунов Г. И., Баженова В. А.* Обеспечение пылевзрывобезопасности подземных горных выработок в угольных шахтах: методы и современные тенденции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 133–149. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_133.

Preventing dust explosions in coal mines: Methods and current trends

A.V. Kornev[1], A.A. Spitsyn[1], G.I. Korshunov[1], V.A. Bazhenova[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: spitsyn1998@inbox.ru

© А.В. Корнев, А.А. Спицын, Г.И. Коршунов, В.А. Баженова. 2023.

Abstract: A growing trend of underground coal mining draws close attention to issues of occupational safety. One of the critical factors to govern the rate of mining operations is emission of explosive gases and dust in the limited spaces of roadways per unit time or per ton of rock. In this and in the last centuries, explosions of gas and dust, repeatedly recorded in coal mines in France, US, Poland, South Africa, Japan, China, Ukraine and Russia, jointly caused tens of thousands of deaths. This article gives the statistics of the largest accidents connected with explosions of hybrid dust/methane/air mixtures in coal mines worldwide, and characterizes the main causes of these tragedies, including imperfection of antidust activities, departure from the dust suppression procedure, sequence and periodicity, as well as the lack of the appropriate production control. The scope of the discussion embraces the present-day methods and approaches to prevention and localization of coal dust explosions, and their weak points. Some engineering solutions proposed may be of practical relevance, given their proper validation, and can improve dust conditions and reduce probability of dust explosions in coal mines.

Key words: dust explosion protection in mines, coal dust, gas and dust explosions, dust laying rate, settling coal dust with slate, dust explosion hydroprotection, hydrogel, quality control in dust laying and in settling coal dust with slate.

For citation: Kornev A. V., Spitsyn A. A., Korshunov G. I., Bazhenova V. A. Preventing dust explosions in coal mines: Methods and current trends. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(3):133-149. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_133.

Введение

В последние годы в угольной отрасли России при усложнении условий ведения горных работ отмечается повышение объемов и дисперсности взрывоопасной угольной пыли, образующейся при разрушении угольных пластов [1, 2]. Это приводит к неблагоприятным изменениям пылевой обстановки в подземных горных выработках и снижению их пылевзрывобезопасности. По данным Росстата добыча угля в Российской Федерации за 2021 г. составила 432 млн т, что на 36,1 млн т (9,1%) больше по сравнению с объемами угля, добытого в 2020 г. [3, 4]. В рамках реализации программы развития угольной промышленности России на период до 2035 г., утвержденной правительством РФ, объемы добычи угля подземным и открытым способом планируется увеличить до 485 млн т в 2035 г. (по консервативному сценарию) или до 668 млн т (по оптимистическому сценарию). Для достижения данных показателей потребуется закрыть большинство нерентабельных и наиболее «опасных» шахт, а также еще больше повысить интенсивность ведения работ на всех остальных предприятиях.

Согласно исследованиям сотрудников одного из крупнейших в нашей стране научно-исследовательских институтов в области промышленной безопасности на горнодобывающих предприятиях — АО «НЦ ВостНИИ», интенсивность пылевыделения и пылеотложения в горных выработках большинства шахт Кузбасса и Воркуты настолько велика, что требуется обрабатывать горные выработки составами, обеспечивающими их пылевзрывобезопасное состояние, не только ежесуточно, но и многократно в течение суток [5]. При этом чем выше интенсивность пылеотложения и концентрация метана в воздухе горных выработок, тем чаще необходимо проводить обработку.

Таблица 1

Крупнейшие аварии с участием метана и угольной пыли в XX–XXI вв.
The largest accidents involving methane and coal dust in the XX–XXI centuries

Название шахты	Год аварии	Страна	Количество погибших, чел.
Winter Quarters	1900	США	более 200
Courrières	1906	Франция	1099
Grube Reden	1907	Германия	150
Monongah	1907	США	362
Darr Mine	1907	США	239
West Stanley	1909	Великобритания	168
Pretoria	1910	Великобритания	344
Vellington	1910	Великобритания	136
Banner	1911	США	128
Stag Canyon Mine	1913	США	263
Мицубиси Ходзё	1914	Япония	687
Hillcrest	1914	Канада	184
Fushun Oyama	1917	Китай	917
Маунт Маллиган	1921	Австралия	75
Stag Canyon Mine	1923	США	123
Heinitzgrube	1923	Польша	145
Casl-Geit	1924	США	172
Nelson	1934	Чехия	134
Бэньсиху (Хонкэйко)	1942	Китай	1549
Dafa Coal Mine	1954	Китай	104
Laobaidong colliery	1960	Китай	682
Longshanmiao Coal Mine	1960	Китай	187
Zhongliangshan Coal Mine	1960	Китай	124
VEB Steinkohlenwerk Karl Marx	1963	ГДР	123
Mitsui Miike	1963	Япония	458
Xinwen Panxi Coal Mine	1969	Китай	115
Jiaoping Coal Mine	1975	Китай	101
Димитров	1979	Польша	34
No. 5 Mine	1981	Китай	133
Пионерка (ш. «Колмогоровская»)	1984	Россия	35
Sanjiaohe Coal Mine	1991	Китай	147
Xinrong Guojiayao Dongcun Coal Mine	1996	Китай	114
Центральная	1998	Россия	27
Muchonggou Coal Mine	2000	Китай	162
Ульяновская	2007	Россия	110
Юбилейная	2007	Россия	39
Распадская	2010	Россия	91
Upper Big branch Mine-South	2010	США	27

С учетом того, что все шахты, расположенные на территории Кузбасса и составляющие основу сырьевой базы подземной угледобычи, являются опасными по газу (17 шахт — опасные по внезапным выбросам угля и газа, 26 шахт — сверхкатегорные, 8 шахт — третьей категории) и взрывчатости угольной пыли [6], дальнейшее наращивание интенсивности ведения горных работ приведет к обострению и так сложной ситуации по газовому и пылевому фактору.

Совсем недавно, в ноябре 2021 г., на шахте «Листвяжная» в Кузбассе прогремел взрыв метана, в результате которого погибло 46 горняков, 5 горноспасателей, еще 106 работников получили травмы различной степени тяжести [7]. Взрывы метана, а также метана и угольной пыли являются, к сожалению, не редкостью [8, 9]. В табл. 1 приведены примеры крупных аварий, связанных со взрывами угольной пыли и газа, произошедших на шахтах в XX — XXI столетиях, каждая из которых унесла жизни не менее 25 чел. [10 — 14].

Приведенная статистика свидетельствует о том, что задачи по обеспечению аэрологической безопасности и пылевзрывобезопасности решены в неполной мере и сегодня. Травматизм, обусловленный воздействием на работников избыточного давления и отравляющих продуктов взрывов метана и угольной пыли, является наиболее тяжелым. Кроме того, высокая запыленность в горных выработках, многократно превышающая предельно допустимую концентрацию (ПДК), не только повышает риск взрыва пыли, но и вызывает развитие профессиональных заболеваний нижних дыхательных путей и легких [15 — 18]. Актуальны и вопросы оценки и снижения аэрологических рисков как в России [19, 20], так и в иных угледобывающих странах [21]. Обеспечение пылевзрывобезопасности и аэрологической безопасности в угольных шахтах является одной из ключевых задач современных систем управления охраной труда и промышленной безопасностью (СУОТ и СУПБ).

Для снижения риска взрывов угольной пыли в подземных горных выработках необходимо разобраться в основных причинах, приведших к данным событиям, и устранить их.

Методы

В работе использованы аналитические и теоретические методы исследования. Основными задачами, решение которых преследовали авторы статьи, являются:

- рассмотрение основных причин взрывов угольной пыли в подземных горных выработках;
- анализ применяемых в настоящее время методов по обеспечению пылевзрывобезопасности как в российских шахтах, так и за рубежом;
- разработка предложений по снижению вероятности аварий, обусловленных пылевым фактором, и сопутствующих профессиональных рисков.

Результаты

Одними из главных причин формирования взрывоопасной среды в угольных шахтах являются:

- высокая метанообильность отрабатываемых пластов и, как следствие, выделение газа в значительных объемах, снижающих нижний концентрационный предел взрываемости угольной пыли [1, 22 — 24];
- повышенный выход мелко- и тонкодисперсных пылевых частиц (размером менее 74 — 100 мкм) вследствие переизмельчения угля резцами шнекового органа комбайна [1, 22, 25];
- несовершенство применяемых методов предупреждения взрывов угольной пыли и методов оценки качества их применения, высокая трудоемкость их реализации [26 — 28];

Таблица 2

Интенсивность пылеотложения в горных выработках угольных шахт Кузбасса
The intensity of dust deposition in the mine workings of Kuzbass coal mines

№ шахты	Интенсивность пылеотложения, P_t, г/м³·сут.			
	Общешахтные выработки	Проходческие забои	Конвейерные выработки	Выработки с исходящей вентиляционной струей из очистного забоя
1	0,1 – 0,11	0,7 – 21,6	1,2 – 42,2	0,1 – 14,4
2	0,2 – 1,3	1,2 – 17,2	1,2	0,2 – 4,6
3	0,1 – 0,8	5,1 – 15,2	1,4 – 2,8	3,3 – 18
4	0,08 – 1,29	0,1 – 12,33	0,2 – 12,7	0,1 – 12,7
5	0,1 – 0,65	1,2 – 3,5	1,2	0,2 – 4,5
6	0,4	21,2	1,2	1,5 – 16,4
7	0,1 – 0,24	0,2 – 2,2	1,2 – 1,46	1,2 – 21,0

• недостаточная эффективность мероприятий по борьбе с пылью [28];

• несоблюдение требуемой периодичности и параметров применяемых мер, сопряженных с низким уровнем производственного контроля [39].

Интенсивность пылевыноса и величина пылеотложения весьма вариативны в зависимости от условий ведения горных работ, свойств массива или угольного пласта в отдельно взятой выработке на конкретной шахте. Под условиями ведения работ понимается, в первую очередь, совокупность факторов, определяющих уровень запыленности в забое, из которого пыль воздушными потоками разносится по выработкам: тип и производительность комбайна, состояние резцов на исполнительном органе, скорость движения воздуха и его влажность, сечение горной выработки. Среди свойств массива или угольного пласта, определяющих процессы пылеобразования и пылепереноса, следует выделить их прочностные характеристики, влажность, зольность, состав минеральной и органической части, плотность, смачиваемость водой и растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Авторами статьи проведен анализ интенсивности пылеотложения на действующих шахтах Кузбасса, результаты которого сведены в табл. 2.

Фактическая интенсивность пылеотложения P_t варьируется в пределах от 0,1 до 1,3 г/м³·сут. в общешахтных выработках (путевых и конвейерных уклонах, вентиляционных и конвейерных квершлагах и штреках и др.), от 0,1 до 21,6 г/м³·сут. в проходческих забоях, от 0,2 до 42,2 г/м³·сут. в конвейерных выработках и от 0,1 до 21,0 г/м³·сут. в выработках с вентиляционной струей воздуха, исходящей из очистного забоя.

Следует отметить, что больше всего сосредотачивается пыли в проходческих и очистных забоях, прилегающим к ним на расстоянии 25 – 150 м участках, в местах перегрузки угля в конвейерных выработках. При этом в ряде конвейерных выработок первой из рассматриваемых шахт в местах перегрузки горной массы значение интенсивности пылеотложения превышает нижний предел взрываемости (табл. 3).

Так, при $\sigma_{отл}$ = 36 г/м³ P_t = 36,7 г/м³·сут., при $\sigma_{отл}$ = 34 г/м³ P_t = 42,2 г/м³·сут. При такой интенсивности пылеотложения мероприятия по приведению выработок в пылевзрывобезопасное состояние осуществляются с периодичностью 3 – 4 раза в сутки.

Таблица 3

Пределы взрываемости угольной пыли, отложившейся в горных выработках угольных шахт Кузбасса
Explosive limits of coal dust deposited in the mine workings of Kuzbass coal mines

№ шахты	Нижний предел взрываемости отложившейся угольной пыли, $\sigma_{отл}$, г/м^3			
	Общешахтные выработки	Проходческие забои	Конвейерные выработки	Выработки с исходящей вентиляционной струей из очистного забоя
1	34 – 36	36	34 – 36	42
2	34 – 45	34 – 45	34 – 45	28 – 34
3	32 – 40	40	32 – 40	40
4	34	34	34	34
5	35	35	35	35
6	23	26	23	23
7	34 – 41	34 – 41	34 – 41	34 – 41

Остановимся поподробнее на основных методах и оборудовании, применяемых для обеспечения пылевзрывобезопасности горных выработок в угольных шахтах.

Главными средствами, «нейтрализующими» взрывчатые свойства угольной пыли, являются на сегодняшний день инертная или сланцевая пыль и вода [26]. Инертная пыль производится согласно ГОСТ Р 51569-2000 «Пыль инертная. Технические условия» и представляет собой тонкоизмельченный доломит или известняк с содержанием фракции –0,16 мм 85% и более, в т.ч. частиц крупностью –0,063 мм не менее 50% с добавкой соединений, повышающих гидрофобность продукта [26]. В качестве гидрофобизаторов используются техническая олеиновая кислота ($C_{18}H_{34}O_2$), стеарат алюминия ($C_{54}H_{105}AlO_6$), талловая или сосновая канифоль ($C_{20}H_{30}O_2$), смесь последней и парафина. К инертной пыли предъявляются жесткие требования к содержанию вредных примесей — мышьяка (As), фосфора (P), кремнезема (SiO_2), горючих веществ и влажности (табл. 4).

Таблица 4

Требования к химическому составу инертной пыли
Requirements for the chemical composition of rock dust

Соединение, элемент	Содержание, %
CaO	не менее 51,0
MgO	не более 2,5
SiO_2	не более 3,0
P	не более 0,06
As	не более 0,003
Влага	не более 1,0
Горючие вещества	не более 0,5

Инертную пыль наносят ручным или механизированным способом [1, 29, 30] на бока, кровлю и почву очищенных горных выработок или непосредственно поверх угольной с целью повышения зольности последней. Механизм действия данного метода обеспечения пылевзрывобезопасности, называемого осланцеванием (осланцовкой), заключается в увеличении доли негорючего материала с более высокой по сравнению с углем теплоемкостью и коэффициентом теплопроводности от 0,45 до 1,0 Вт/м·К, который забирает большую часть теплового импульса на себя, препятствуя таким образом последующей передаче энергии взрывоопасным угольным частицам [29,

30]. Это же свойство используется при устройстве сланцевых заслонов, являющихся пассивными средствами локализации взрывов метана и угольной пыли. При взрыве возникает и распространяется по горным выработкам фронт пламени и ударная волна, которая, подойдя к заслону, приводит к опрокидыванию полок, пластиковых емкостей или разрыву полиэтиленовых пакетов (карманов) с инертной пылью, размещенных под кровлей выработки. Образуется пылевое облако из инертного материала, действие которого заключается в разбавлении концентрации перешедшей во взвешенное состояние угольной пыли до взрывобезопасной величины, изолировании фронта пламени и снижении кинетики реакции взрыва за счет уменьшения температуры в зоне горения до значения, не превышающего температуру воспламенения угольной пыли [31 — 33]. Для достижения указанного эффекта требуется обеспечение:

- необходимого количества инертной пыли в заслоне, которое должно быть не менее 400 кг на 1 м^2 поперечного сечения выработки;
- соответствующей расстановки емкостей и полок, общая длина рядов которых должна быть 20 м и более;
- расположения заслона от очага взрыва на расстоянии не менее 60 м и не дальше 300 м;
- поддержания инертной пыли в разрыхленном состоянии, и периодической ее замены.

Следует обратить внимание на различие задач, решаемых проведением процедуры осланцевания и установкой заслонов из инертной пыли. Осланцевание выполняет превентивную функцию — предупреждает взрыв угольной пыли, скопившейся во взрывоопасных количествах на горном оборудовании и поверхностях горных выработок, в случае взрыва метана, пожара или иных высокотемпературных воздействий. Заслоны же предотвращают, тормозят распространение по горным выработкам ударной волны и фронта пламени при взрывах как угольной пыли, так и метана, т.е. работают как «запасной» парашют.

Важнее все же, на наш взгляд, не допустить аварию, нежели ее локализовывать. Для обеспечения эффективности осланцевания, широко применяемого на угледобывающих предприятиях как в России [1, 23, 26], так и за рубежом [29, 31 — 34], требуется:

- корректное определение количества инертной пыли, необходимого для приведения во взрывобезопасное состояние 1 п. м. или 1 м^2 горной выработки;
- соблюдения требуемого расхода инертной пыли и периодичности ее нанесения;
- реализации качественного контроля за состоянием пылевзрывобезопасности на осланцованных участках.

Расход инертной пыли ($q_{осл}$) зависит от размеров обрабатываемой горной выработки и «степени» взрывоопасности осевшей угольной пыли, выражаемой через нижний концентрационный предел взрываемости ($\sigma_{отл}$.), и определятся по формуле:

$$q_{осл} = (0{,}001 \cdot N \cdot \sigma_{отл} \cdot S)/(100 - N), \text{ кг/м} \quad (1)$$

где N — норма осланцевания, %; $\sigma_{отл}$ — нижний предел взрываемости отложившейся угольной пыли (г/м^3); S — площадь поперечного сечения выработки, м^2.

Показатель N отражает такое содержание негорючих веществ в инертно-угольной пылевой смеси, при котором ее взрыв невозможен:

$$N = \frac{A^{daf} \cdot (100 - D)}{100} + D, \% \quad (2)$$

где A^{daf} — зольность угля, %; D — добавка инертной пыли, %.

Величина D зависит от содержания уже имеющихся в угле минеральных ве-

Рис. 1. Основные узлы и элементы ДИП-1
Fig. 1. Main units and elements of DIP-1

ществ и летучих соединений, определяется по специальной номограмме.

Для рассмотренных выше шахт Кузбасса норма осланцевания составляет 87—89%. Для сравнения в угольных шахтах США данный показатель варьируется в пределах от 65 до 80%, Австралии — 70—85%, Чехии — 80—85%. Однако расход инертной пыли на осланцевание в России в 2—4 раза ниже относительно указанных угледобывающих стран [29].

Для понимания того, насколько часто необходимо проводить осланцевание для поддержания выработок во взрывобезопасном состоянии, пользуются следующей формулой:

$$T_n = (K \cdot K_{CH4} \cdot \sigma_{отл})/P_t \qquad (3)$$

где K — коэффициент, характеризующий продолжительность действия осланцевания, $K = 1$; K_{CH_4} — коэффициент, учитывающий влияние содержания метана в воздухе выработки, $K_{CH_4} = 0{,}25—0{,}75$; P_t — интенсивность пылеотложения, г/м^3·сут.

В настоящее время интенсивность пылеотложения рассчитывается по эмпирическим формулам на основании результатов измерений фактической запыленности на рассматриваемом участке горной выработки или массы пыли, осевшей на разложенных подложках, либо измеряется непосредственно с помощью датчиков, интегрированных в подсистему аэрогазового контроля (АГК) многофункциональной системы безопасности (МФСБ), обслуживающей шахту [23, 34, 35]. Примером такого оборудования может служить недавно разработанная система контроля пылеотложения, запыленности и дисперсного состава СКИП [34, 35] и входящий в реестр средств измерений датчик интенсивности пылеотложения ДИП-1 (рис. 1) отечественного производства [23].

Определение массы отложившейся пыли и поверхностной плотности в приборе осуществляется посредством измерения перемещения упругого элемента под нагрузкой пыли, осевшей на приемной платформе, с последующим преобразованием полученной информации в электрический сигнал и выводом результатов на дисплей. Датчик позволяет регистрировать массу осевшей пыли в пределах от 50 до 500 мг и определять поверхностную плотность пыли — от 5 до 100 г/м^2. В случае чрезмерно высокой запыленности в горной выработке датчик передает соответствующий сигнал в диспетчерскую и может осуществить автоматическое отключение электроэнергии на участке во избежание взрыва [23].

Для того, чтобы сократить затраты времени на проведение осланцевания и уменьшить нагрузку на рабочих, как на зарубежном, так и отечественном рынках предложен ряд оборудования для механизации данного вида работ. Предлагаемые к использованию осланцеватели можно разделить по конструктивным особенностям на стационарные, колесного типа, монорельсовые с различными типами приводов (гидравлическим, пневматическим, электрическим). Шахтные осланцеватели достаточно просты в устройстве: в большинстве случаев представляют собой металлическую емкость, оснащенную вентилятором (например, ВМЭ-5, ВМЭ-6, ВМЭ-8 и т.п.). Инертная пыль загружается в эту емкость и воздушным потоком, создаваемым вентилятором, разносится по направлению воздушной струи в горной выработке на значительные расстояния. В отдельных случаях осланцеватели оснащаются воздушными турбинами, питательным шнеком, смесительной камерой и рукавом, предполагается непосредственное участие работника (рис. 2, 3). Изображения оборудования на рисунках взяты с сайтов производителей.

Малогабаритные осланцеватели типа SMYK и DROMADER (рис. 2) оснащаются стандартными рукавами для осланцевания длиной 20 м и диаметром 50 мм, которые могут быть соединены между собой в более длинные сети, обеспечивающие максимальную дальность подачи инертной пыли 60 м и 1000 м соответственно. При длине рукава 20 м осланцеватели типа SMYK обеспечивают подачу инертной пыли с производительностью 22 кг/мин и имеют объем, равный 0,05 м^3. Осланцеватели типа DROMADER характеризуются производительностью от 49 кг/мин до 250 кг/мин при длине рукава 1000 м и 180 м соответственно и вмещают до 0,3 м^3 инертной пыли. Осланцеватели указанных типов могут быть установлены как стационарно, так и на подвесных локомотивах.

Осланцеватель ОПШ-01 (рис. 3, *а*) предусматривает подачу осланцовочного материала через рукава длиной 20 м с производительностью 35 — 40 кг/мин, он может транспортироваться по почве выработок через проушины грузоподъемными устройствами либо подвесными гидравлическими подъемниками или тележками на монорельсе грузоподъемностью 4 т.

Осланцеватель типа ОГ-1 «Буран» (рис. 3, *б*) предназначен для осланцевания горных выработок с площадью сечения до 25 м^2 с подачей инертной пыли от 120 до 300 кг за одну минуту на расстояние до 43,6 км. Данный вид оборудования является крупногабаритным —

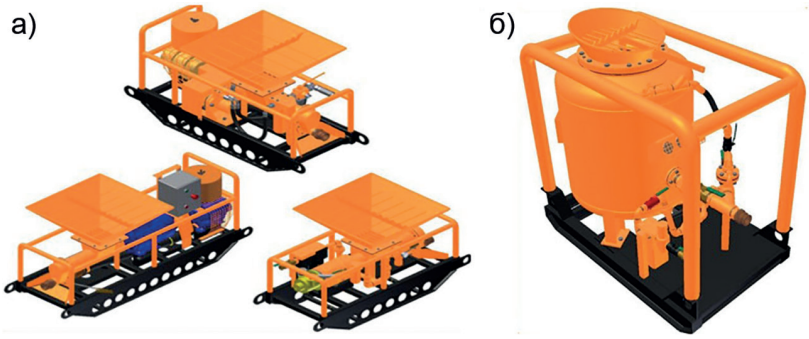

Рис. 2. Примеры осланцевателей (производство — Польша): осланцеватели типа SMYK (а); осланцеватель DROMADER (б)

Fig. 2. Rock dusters (Poland): SMYK dusters (a); DROMADER duster (b)

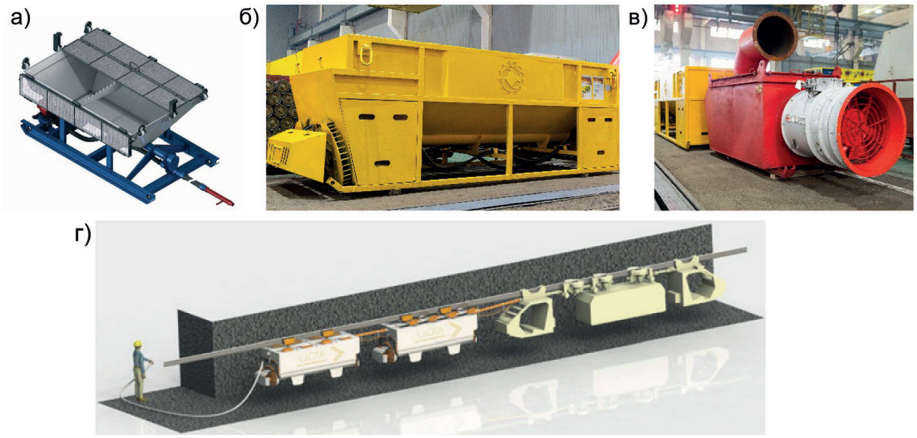

Рис. 3. Примеры осланцевателей (производство — Россия): осланцеватель ОПШ-01 (а); осланцеватель типа ОГ-1 «Буран» (б); осланцеватель типа УО (в); осланцовочные установки типа ЦГМ-ОГП (г)
Fig. 3. Rock dusters (Russia) OPSH-01 duster (a); OG-01 BURAN duster (b); UO duster (v); CGM-OGP duster (g)

имеет размеры 1390×4190×1370 мм, вмещает 2,5 м^3 инертной пыли.

Осланцеватели типа УО (рис. 3, *в*) рассчитаны на объем 0,9 — 2,5 м^3, оснащаются вентиляторами ВМЭ-5 и ВМЭ-6 с номинальной подачей 3,65 и 7 м^3/с. Осланцовочные установки типа ЦГМ-ОГП (рис. 3, *г*) присоединяются к шахтным дизельным локомотивам, перемещающимся по подвесным монорельсовым дорогам. В зависимости от конкретной модели обеспечивают скорость осланцевания до 35 — 70 м/мин при расходе инертной пыли от 2,5 — 5,0 до 12 — 24 кг/м.п. в выработках с сечением 20 — 25 м^2, имеют объем 1,5 и 4,5 м^3.

Контроль качества осланцевания горных выработок в настоящее время осуществляется несколькими методами:

- визуальным осмотром;
- путем ежеквартального отбора в горных выработках проб осевшей пыли в смеси с инертной и определения в них содержания негорючих веществ на стационарном лабораторном оборудовании военизированного горноспасательного отряда или взвода, обслуживающего конкретную шахту;
- экспресс-оценкой содержания инертной пыли в пробах, отобранных со стенок горных выработок, непосредственно в шахте с помощью переносных приборов [26].

В основе экспресс-анализа, проводимого с помощью прибора контроля пылевзрывобезопасности (ПКП) и анализа в лабораториях ВГСЧ, лежит измерение объема углекислого газа, выделяющегося при взаимодействии инертной пыли, содержащейся в отобранной пробе, с реактивом, в качестве которого чаще всего используется лимонная или соляная кислота [26]. Еще одним методом пылевзрывозащиты в угольных шахтах является обмывка горных выработок водой. Защитное действие влаги заключается в:

- увлажнении мелких пылевых частиц, которые коагулируются в более крупные, в результате чего уменьшается их удельная поверхность и замедляются поверхностные химические реакции;
- в связывании осевшей пыли и удержании ее от перехода во взвешенное состояние;
- высокой теплоемкости воды, на испарение которой тратится энергия теплового импульса.

Следует отметить, что в соответствие с приказом Ростехнадзора от 20.12.2012 № 743 «Об утверждении методических

рекомендаций по проведению экспертных работ при расследовании технических причин аварий в угольных шахтах» пылевзрывобезопасным считается такое состояние горной выработки, при котором влажность осевшей на ее поверхностях пыли составляет не менее 12%. Для предотвращения взметывания пыли и повышения ее смачиваемости применяются различные смачивающие и пылесвязывающие растворы. В выработках с невысокой интенсивностью пылеотложения, не превышающей 1,2 г/м^3·сут. (например, околоствольный двор, капитальные откаточные и вентиляционные выработки) проводят их побелку.

Периодичность проведения процедур рассчитывается по формуле (3), в которую подставляется коэффициент, учитывающий эффективность конкретного метода.

При ведении взрывных работ в тупиковых выработках поверхность забоя и прилегающие к нему выработки тщательно обмываются водой или пылесмачивающими составами либо осланцовываются на расстояние не менее 20 м. При взрывании по углю и породе шпуры бурят на глубину не менее 0,6 м, используют предохранительные взрывчатые вещества соответствующего класса.

Обсуждение результатов

Как следует из анализа данных проведенных исследований, ситуация с пылевой обстановкой на угольных шахтах нашей страны остается довольно сложной. Добываемые угли характеризуются высоким выходом летучих веществ, относительно небольшой зольностью, что делает образующуюся в процессе ведения горных работ угольную пыль чрезвычайно взрывоопасной. Фактическая интенсивность пылеотложения весьма близка к нижнему пределу взрываемости, а в некоторых горных выработках превышает его.

Осланцевание является на сегодняшний день фактически основным средством обеспечения пылевзрывобезопасности подземных горных выработок шахт большинства угледобывающих стран. Методика расчета расхода инертной пыли и периодичности ее нанесения, а также механизм действия хорошо изучены и понятны. Сырьевая база и оборудование для механизации работ по осланцеванию имеются в наличии. Однако до сих пор происходят аварии, связанные со взрывами угольной пыли, нередко выявляются несоответствия в содержании негорючих веществ в отложившейся угольной пыли в смеси с инертной относительно нормы осланцевания. Кроме того, процедура осланцевания никак не влияет на концентрацию взрывоопасной взвешенной и перемещаемой воздушными потоками угольной пыли. Наоборот, сланцевая пыль снижает видимость при ее использовании, может попадать в глаза и органы дыхания работников, приводя при длительном контакте к негативным последствиям. Инертная пыль может слеживаться и терять свои «защитные», в т.ч. гидрофобные свойства, пропорционально увеличению значения влажности воздуха. Методы, заложенные в приборной базе по оперативному измерению запыленности, интенсивности пылеотложения и качества осланцевания, хоть и являются современными, но дают достаточно высокую погрешность (до 20%), что не всегда приемлемо.

Все это наталкивает на мысль — рассмотреть альтернативные средства пылевзрывозащиты. В нормативной документации, включая ГОСТ Р 54776-2011, говорится о возможности применения помимо обмывки горных выработок обработки их смачивающими и связывающими составами. Эти составы имеют преимущество перед использованием только воды, которое заключается в улучшении смачиваемости пыли, скорости

и степени ее влагонасыщения, а также меньшем времени испарения с поверхности и более длительном поддерживании влажности слоя осевшей пыли. Если водные растворы смачивателей в настоящее время на шахтах широко используется, прежде всего, для целей пылеподавления, то о применении связывающих составов ничего не слышно.

По мнению авторов, обработка горных выработок с определенной интенсивностью пылеотложения пылесвязывающими растворами может оказаться в некоторых случаях предпочтительнее осланцевания. В качестве пылесвязывающего состава предлагается рассмотреть водный раствор гидрогеля.

Анализ иностранных источников [36—38] свидетельствует о том, что за рубежом начинают проявлять к этому вопросу интерес, и проводить исследования в данном направлении. В частности, на сегодняшний день разработаны некоторые рецептуры гидрогелей для обработки углей с целью предотвращения их самовозгорания и пыления.

Заключение

Статистика аварий с участием угольной пыли, а также данные об условиях труда в угольных шахтах подтверждают вывод о нерешенности вопроса обеспечения безопасности по пылевому фактору. С учетом современной конъюнктуры рынка и перспектив развития угольной отрасли запланированное к 2035 г. увеличение объемов добычи угля приведет к еще большему росту пылевых нагрузок на атмосферу горных выработок. Уже сегодня интенсивность пылеотложения в ряде случае превышает нижний порог взрываемости угольной пыли, что требует усиления применяемых мер пылевзрывозащиты, а возможно, и пересмотра существующих подходов.

С учетом описанных в работе недостатков применяемого повсеместно на шахтах осланцевания, актуальным представляется использование для определенных условий водных растворов гидрогелей вместо инертной пыли.

Несомненно, требуется тщательная проработка данного вопроса с проведением комплекса исследований.

В настоящее время авторами начата работа по исследованию физико-химических, в т.ч. адгезионных свойств растворов гидрогеля, результаты которого будут отражены в последующих статьях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Романченко С. Б.*, *Костеренко В. Н.* Полномасштабные исследования взрывов угольной пыли и критерии эффективности средств локализации // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2018. — № 4. — С. 6—20.

2. *Смирняков В. В.*, *Родионов В. А.*, *Смирнякова В. В.*, *Орлов Ф. А.* Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 71—81. DOI: 10.31897/PMI.2022.12.

3. *Петренко И. Е.* Итоги работы угольной промышленности России за 2021 год // Уголь. — 2022. — № 3. — С. 9—23. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-9-23.

4. *Таразанов И. Г.* Итоги работы угольной промышленности России за январь-сентябрь 2021 года // Уголь. — 2022. — № 1. — С. 47—58. DOI: 10.18796/0041-5790- 2022-1-47-58.

5. *Литвинов А. Р.*, *Коликов К. С.*, *Ишхнели О. Г.* Аварийность и травматизм на предприятиях угольной промышленности в 2010—2015 годах // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2017. — № 2. — С. 6—17.

6. *Фомин А. И.* Анализ условий и охраны труда на предприятиях угольной отрасли Кузбасса // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2020. — № 3. — С. 57—61. DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.53.88.007.

7. *Коробейникова Е. А.*, *Панарина А. В.*, *Куксова К. Д.*, *Пудовкина А. А.* Взрыв на шахте «Листвяжная»: рассуждения и выводы / Наука России — будущее страны: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. — Пенза: Наука и Просвещение, 2022. — С. 230—235.

8. *Smirnyakov V. V.*, *Smirnyakova V. V.*, *Pekarchuk D. S.*, *Orlov F. A.* Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1917—1929.

9. *Ермолаев А. М.*, *Кобылянский М. Т.* Анализ и пути снижения смертельного травматизма в угольной промышленности // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2017. — № 2. — С. 91—100.

10. *Фомин А. И.*, *Ворошилов Я. С.*, *Палеев Д. Ю.* Исследование влияния угольной пыли на безопасность ведения горных работ // Горная промышленность. — 2019. — № 1(143). — С. 33. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-1-143-33-36.

11. *Левкин Н. Б.* Предотвращение аварий и травматизм в угольных шахтах Украины. — Донецк: Донбасс, 2002. — 392 с.

12. *Данилов А. Г.*, *Грачев Э. А.*, *Кульчицкий С. В.*, *Галиев М. Г.* Свойства и параметры, определяющие взрывчатость угольной пыли // Евразийский научный журнал. — 2015. — № 8. — С. 12—17.

13. *Zhang H., Han W., Xu Y., Wang Z.* Analysis on the development status of coal mine dust disaster prevention technology in China // Journal of Healthcare Engineering. 2021, vol. 2021, article 5574579. DOI: 10.1155/2021/5574579.

14. *Luo Y., Wang D., Cheng J.* Effects of rock dusting in preventing and reducing intensity of coal mine explosions // International Journal of Coal Science and Technology. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 102—109. DOI: 10.1007/s40789-017-0168-z.

15. *Gridina E. B.*, *Kovshov S. V.*, *Borovikov D. O.* Hazard mapping as a fundamental element of OSH management systems currently used in the mining sector // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022, vol. 1, pp. 107—115.

16. *Гридина Е. Б.*, *Боровиков Д. О.* Выявление причин травматизма на основе карт оценки профессиональных рисков на угольном разрезе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-1. — С. 114—128. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_114.

17. *Гендлер С. Г.*, *Габов В. В.*, *Бабырь Н. В.*, *Прохорова Е. А.* Обоснование технических решений по снижению производственного травматизма в лавах угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 5—19. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_5.

18. *Гендлер С. Г.*, *Прохорова Е. А.* Оценка совокупного влияния производственного травматизма и профессиональных заболеваний на состояние охраны труда в угольной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10-2. — С. 105—116. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_105.

19. *Balovtsev S. V.* Higher rank aerological risks in coal mines // Mining Science and Technology (Russia). 2022, vol. 7, no. 4, pp. 310–319. DOI:10.17073/2500-0632-2022-08-18.

20. *Баловцев С. В.*, *Скопинцева О. В.*, *Куликова Е. Ю.* Иерархическая структура аэрологических рисков в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 276–285. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

21. *Хоссейни А.*, *Наджафи М.*, *Моршеди А. Х.* Определение подходящего расстояния между скважинами дегазации метана на механизированной угольной шахте Табас (Иран) на основе теоретических расчетов и полевых исследований // Записки Горного института. — 2022. — Т. 258. — С. 1050—1060.

22. *Родионов В. А.*, *Цыганков В. Д.*, *Жихарев С. Я.*, *Кормщиков Д. С.* Методика исследования аэродинамических свойств каменноугольной пыли в протяженных горизонтальных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10. — С. 69—79. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_69.

23. *Харченко В. Ф.* Исследование пылеотложения в горных выработках угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № S30. — С. 17—23. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-30-17-23.

24. *Khokhlov S., Abiev Z., Makkoev V.* The choice of optical flame detectors for automatic explosion containment systems based on the results of explosion radiation analysis of methane- and dust-air mixtures // Applied Sciences (Switzerland). 2022, vol. 12, no. 3, pp. 1—16. DOI: 10.3390/app12031515.

25. *Габов В. В.*, *Суан Н. В.*, *Задков Д. А.*, *Тхо Ч. Д.* Увеличение содержания крупных фракций в добываемой массе угля комбайном с использованием парных срезов // Записки Горного института. — 2020. — Т. 257. — С. 764—770. DOI: 10.31897/PMI.2022.66.

26. *Романченко С. Б.*, *Нагановский Ю. К.*, *Корнев А. В.* Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Записки Горного института. — 2021. — Т. 252. — С. 927—936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.

27. *Родионов В. А.*, *Турсенев С. А.*, *Скрипник И. Л.*, *Ксенофонтов Ю. Г.* Результаты исследования кинетических параметров самовозгорания каменноугольной пыли // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 617—622. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.

28. *Borowski G.*, *Smirnov Y. D.*, *Ivanov A. V.*, *Danilov A. S.* Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2020, vol. 1, no. 1, pp. 1—13. DOI: 10.1080/19392699.2020.1841177.

29. *Harteis S. P.*, *Alexander D. W.*, *Harris M. L.*, *Sapko M. J.*, *Weiss E. S.* Review of rock dusting practices in underground coal mines. Report of investigations (National Institute for Occupational Safety and Health). 2017, vol. 101, IC 9530. 97 p.

30. *Luo Y., Wang D., Cheng J.* Effects of rock dusting in preventing and reducing intensity of coal mine explosions // International Journal of Coal Science and Technology. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 102—109.

31. *Thakur P.* Respirable coal dust, combustible gas and mine fire control / Advanced Mine Ventilation. 2019, pp. 377—398. DOI: 10.1016/B978-0-08-100457-9.00023-7.

32. *Harris M. L.*, *Sapko M. L.* Floor dust erosion during early stages of coal dust explosion development // International Journal of Mining Science and Technology. 2019, vol. 29, pp. 825—830. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.09.001.

33. *Maier P., Hartlieb P.*, *Brune J. F.* Laboratory scaled coal dust explosions and physical test results for CFD explosion models // Berg Huettenmaenn Monatsh. 2020, vol. 165, no. 6. pp. 265—269. DOI:10.1007/s00501-020-00985-0.

34. *Трубицына Д. А.*, *Подображин С. Н.* Умные системы непрерывного автоматического контроля отложений пыли по сети горных выработок угольных шахт // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2021. — № 3. — С. 6—17.

35. *Трубицына Д. А.* Разработка системы непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложения как подсистемы многофункциональной системы безопасности угольной шахты // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 12. — С. 58—64. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-12-58-64.

36. *Ren X., Xue D., Li Y., Hu X., Shao Z., Cheng W., Dong H., Zhao Y., Xin L., Lu W.* Novel sodium silicate polymer composite gels for the prevention of spontaneous combustion of coal // Journal of Hazardous Materials. 2019, vol. 371, pp. 643—654. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.041.

37. *Tsai Y.-T., Yang Y., Wang C., Shu C.-M., Deng J.* Comparison of the inhibition mechanisms of five types of inhibitors on spontaneous coal combustion // International Journal of Energy Research. 2018, vol. 42, no. 3, pp. 1158—1171.

38. *Jiang Z., Dou G.* Preparation and characterization of chitosan grafting hydrogel for mine-fire fighting // ACS Omega. 2020, vol. 5, no. 5, pp. 2303—2309. DOI: 10.1021/acsomega.9b0355.

39. *Федеральная* служба по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения 12.12.2022). ГИАБ

REFERENCES

1. Romanchenko S. B., Kosterenko V. N. Coal dust explosions full-scale research and localization means efficiency criteria. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2018, no. 4, pp. 6 — 20. [In Russ].

2. Smirnyakov V. V., Rodionov V. A., Smirnyakova V. V., Orlov F. A. The influence of the shape and size of dust fractions on their distribution and accumulation in mine workings when changing the structure of air flow. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 71 — 81. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.12.

3. Petrenko I. E. Russia's coal industry performance for January — December, 2021. *Ugol'*. 2022, no. 3, pp. 9 — 23. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-9-23.

4. Tarazanov I. G. Russia's coal industry performance for January — September 2021. *Ugol'*. 2022, no. 1, pp. 47 — 58. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790- 2022-1-47-58.

5. Litvinov A. R., Kolikov K. S., Ishkhneli O. G. Accident and injuries at the enterprises of the coal industry in 2010 — 2015. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2017, no. 2, pp. 6 — 17. [In Russ].

6. Fomin A. I. Analysis of conditions and labor protection at enteprises of Kuzbass coal industry. *Bulletin of the Scientific Center of VostNII on Industrial and Environmental Safety*. 2020, no. 3, pp. 57 — 61. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.53.88.007.

7. Korobeynikova E. A., Panarina A. V., Kuksova K. D., Pudovkina A. A. Explosion at the Listvyazhnaya mine: reasoning and conclusions. *Nauka Rossii — budushchee strany: sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science of Russia — the future of the country: collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference], Penza, Nauka i Prosveshchenie, 2022, pp. 230 — 235. [In Russ].

8. Smirnyakov V. V., Smirnyakova V. V., Pekarchuk D. S., Orlov F. A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1917 — 1929.

9. Ermolaev A. M., Kobylyansky M. T. Analysis and ways to reduce fatal injuries in the coal industry. *Bulletin of the Scientific Center of VostNII on Industrial and Environmental Safety*. 2017, no. 2, pp. 91 — 100. [In Russ].

10. Fomin A. I., Voroshilov Ya. S., Paleev D. Yu. Study of the influence of coal dust on the safety of mining operations. *Russian Mining Industry Journal*. 2019, no. 1(143), pp. 33. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-1-143-33-36.

11. Levkin N. B. *Predotvrashchenie avariy i travmatizm v ugol'nykh shakhtakh Ukrainy* [Prevention of accidents and injuries in coal mines in Ukraine], Donetsk, Donbass, 2002, 392 p.

12. Danilov A. G., Grachev E. A., Kulchitsky S. V., Galiev M. G. Properties and parameters that determine the explosiveness of coal dust. *Evraziyskiy nauchnyy zhurnal*. 2015, no. 8, pp. 12 — 17. [In Russ].

13. Zhang H., Han W., Xu Y., Wang Z. Analysis on the development status of coal mine dust disaster prevention technology in China. *Journal of Healthcare Engineering*. 2021, vol. 2021, article 5574579. DOI: 10.1155/2021/5574579.

14. Luo Y., Wang D., Cheng J. Effects of rock dusting in preventing and reducing intensity of coal mine explosions. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 102 — 109. DOI: 10.1007/s40789-017-0168-z.

15. Gridina E. B., Kovshov S. V., Borovikov D. O. Hazard mapping as a fundamental element of OSH management systems currently used in the mining sector. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, vol. 1, pp. 107 — 115.

16. Gridina E. B., Borovikov D. O. Identification of the causes of injuries based on occupational risk assessment maps at the open-pit coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 114 — 128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_114.

17. Gendler S. G., Gabov V. V., Babyr N. V., Prokhorova E. A. Justification of engineering solutions on reduction of occupational traumatism in coal longwalls. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 5 — 19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_5.

18. Gendler S. G., Prokhorova E. A. Assessment of the cumulative impact of occupational injuries and diseases on the state of labor protection in the coal industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10-2, pp. 105 — 116. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_105.

19. Balovtsev S. V. Higher rank aerological risks in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 4, pp. 310–319. DOI:10.17073/2500-0632-2022-08-18.

20. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu. Hierarchical structure of aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 276–285. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

21. Hosseini A., Najafi M., Morshedy A. H. Determination of suitable distance between methane drainage stations in Tabas mechanized coal mine (Iran) based on theoretical calculations and field investigation. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 258, pp.1050 — 1060. [In Russ].

22. Rodionov V. A., Tsygankov V. D., Zhikharev S. Ya., Kormshchikov D. S. Research procedure for coal dust aerodynamics in long roadways. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10, pp. 69–79. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_69.

23. Kharchenko V. F. Investigation of dust deposits in the mine workings of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. S30, pp. 17 — 23. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-30-17-23.

24. Khokhlov S., Abiev Z., Makkoev V. The choice of optical flame detectors for automatic explosion containment systems based on the results of explosion radiation analysis of methane- and dust-air mixtures. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022, vol. 12, no. 3, pp. 1 — 16. DOI: 10.3390/app12031515.

25. Gabov V. V., Xuan N. V., Zadkov D. A., Tho T. D. Increasing the content of coarse fractions in the mined coal mass by a combine using paired cuts. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 257, pp. 764 — 770. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.66.

26. Romanchenko S. B., Naganovskiy Y. K., Kornev A. V. Innovative ways to control dust and explosion safety of mine workings. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 252, pp. 927 — 936. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.

27. Rodionov V. A., Tursenev S. A., Skripnik I. L., Ksenofontov Y. G. Results of the study of kinetic parameters of spontaneous combustion of coal dust. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 617 — 622. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.

28. Borowski G., Smirnov Y. D., Ivanov A. V., Danilov A. S. Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2020, vol. 1, no. 1, pp. 1 — 13. DOI: 10.1080/19392699.2020.1841177.

29. Harteis S. P., Alexander D. W., Harris M. L., Sapko M. J., Weiss E. S. *Review of rock dusting practices in underground coal mines*. Report of investigations (National Institute for Occupational Safety and Health). 2017, vol. 101, IC 9530. 97 p.

30. Luo Y., Wang D., Cheng J. Effects of rock dusting in preventing and reducing intensity of coal mine explosions. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 102 — 109.

31. Thakur P. Respirable coal dust, combustible gas and mine fire control. *Advanced Mine Ventilation*. 2019, pp. 377 — 398. DOI: 10.1016/B978-0-08-100457-9.00023-7.

32. Harris M. L., Sapko M. L. Floor dust erosion during early stages of coal dust explosion development. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, vol. 29, pp. 825 — 830. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.09.001.

33. Maier P., Hartlieb P., Brune J. F. Laboratory scaled coal dust explosions and physical test results for CFD explosion models. *Berg Huettenmaenn Monatsh*. 2020, vol. 165, no. 6. pp. 265 — 269. DOI:10.1007/s00501-020-00985-0.

34. Trubitsyna D. A.., Podobrazhin S. N. Smart systems for continuous automatic control of dust deposits in the network of mining workings of coal mines. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2021, no. 3, pp.6 — 17. [In Russ].

35. Trubitsyna D. A. Development of the system for continuous automatic control of dustiness and dust deposits intensity as a subsystem of the multifunctional safety system of a coal mine.

Occupational Safety in Industry. 2021, no. 12, pp. 58—64. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-12-58-64.

36. Ren X., Xue D., Li Y., Hu X., Shao Z., Cheng W., Dong H., Zhao Y., Xin L., Lu W. Novel sodium silicate polymer composite gels for the prevention of spontaneous combustion of coal. *Journal of Hazardous Materials*. 2019, vol. 371, pp. 643—654. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.041.

37. Tsai Y.-T., Yang Y., Wang C., Shu C.-M., Deng J. Comparison of the inhibition mechanisms of five types of inhibitors on spontaneous coal combustion. *International Journal of Energy Research*. 2018, vol. 42, no. 3, pp. 1158—1171.

38. Jiang Z., Dou G. Preparation and characterization of chitosan grafting hydrogel for mine-fire fighting. *ACS Omega*. 2020, vol. 5, no. 5, pp. 2303—2309. DOI: 10.1021/acsomega.9b0355.

39. *Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru* [Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision], available at: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (accessed 12.12.2022). [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корнев Антон Владимирович[1] — канд. техн. наук, доцент, e-mail: Kornev_AV@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0001-6371-9969,
Спицын Андрей Александрович[1] — аспирант, e-mail: spitsyn1998@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-1148-6109,
Коршунов Геннадий Иванович[1] — д-р техн. наук, профессор, e-mail: Korshunov_GI@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-2074-9695,
Баженова Виолетта Андреевна[1] — магистрант, e-mail: viola.bazhenova@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-3891-5735,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Спицын А.А., e-mail: spitsyn1998@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Kornev[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: Kornev_AV@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0001-6371-9969,
A.A. Spitsyn[1], Graduate Student, e-mail: spitsyn1998@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-1148-6109,
G.I. Korshunov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: Korshunov_GI@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-2074-9695,
V.A. Bazhenova[1], Master's Degree Student, e-mail: viola.bazhenova@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-3891-5735,
[1] Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: A.A. Spitsyn, e-mail: spitsyn1998@inbox.ru.

Получена редакцией 28.12.2022; получена после рецензии 28.01.2023; принята к печати 10.02.2023.
Received by the editors 28.12.2022; received after the review 28.01.2023; accepted for printing 10.02.2023.