

НАУЧНО ОБОСНОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ И ПРОЕКТИРУЕМЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

С.В. Баловцев¹, О.В. Скопинцева¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: balovcev@yandex.ru

Аннотация: Актуальность повышения аэрологической безопасности угольных шахт обусловлена усложнением горно-геологических условий разработки угольных пластов и интенсификацией производственных процессов при подземной добыче угля. Методология оценки аэрологических рисков шахт включает фоновую составляющую, к которой относят горно-геологические характеристики разрабатываемых пластов, и системную составляющую, к которой относят горнотехнические условия отработки угольных пластов. На основании проведенных исследований представлены результаты оценки степени аэрологического риска I, II и III рангов для сверхкатегорных шахт и шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа для разных вентиляционных режимов, которые отражают наиболее благоприятные и неблагоприятные условия угледобычи. Установлено, что аэрологические риски всех рангов в большей степени определяются фоновыми показателями (газоносностью пластов, склонностью к самовозгоранию, горным ударам, пылеобразующей способностью и др.), чем системными факторами (способами и схемами вентиляции, газообильностью участка, нагрузкой на очистной забой и др.). Научно обоснован комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей на выемочных участках, реализуемый в виде способа увлажнения угольных пластов газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ). Способ может быть использован для воздействия на угольный пласт с целью снижения его пылеобразующей способности и газовыделения, а также повышения эффективности пылеулавливания при отбойке угля. Разработана методика обработки угольного массива газонаполненными растворами ПАВ, включающая использование рациональных параметров увлажнения.

Ключевые слова: угольная шахта, ранги аэрологических рисков, метан, угольная пыль, схемы и способы вентиляции шахт, дегазация, увлажнение пластов, газонаполненный раствор, поверхностно-активные вещества.

Для цитирования: Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Научно обоснованные технологические решения по снижению аэрологических рисков на действующих и проектируемых угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 139–151. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_139.

Science-based technological solutions for aerological risks reducing in operating and designing coal mines

S.V. Balovtsev¹, O.V. Skopintseva¹

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia, e-mail: balovcev@yandex.ru

Abstract: The relevance of increasing the coal mines aerological safety is due to the complication of mining and geological conditions for the development of coal seams and the intensification of production processes in underground coal mining. The methodology for assessing the aerological risks of mines includes a background component, which consists the mining and geological characteristics of the developed seams, and a systemic component, which consider mining coal seams conditions. On the basis of the research carried out, calculations were made. The results of assessing the degree of aerological risk of I, II and III ranks for super-category mines and mines angerous due to coal and gas sudden outbursts for different ventilation modes, which reflect the most favorable and unfavorable conditions of coal mining, are presented. It has been established that aerological risks of all ranks are determined to a greater extent by background indicators (gas content of formations, tendency to spontaneous combustion, rock bumps, dust-forming capacity, etc.) than by systemic factors (ventilation methods and schemes, gas content of the area, load on the stope, etc.). A comprehensive method for reducing dust and gas hazards in excavation areas, implemented as a method of moistening coal seams with gas-filled solutions of surfactants, has been scientifically substantiated. The method can be used to influence the coal seam in order to reduce its dust-forming capacity and gas emission, as well as to increase the efficiency of dust collection during coal breaking. A technique for coal mass treating with gas-filled solutions of surfactants was developed, including the use of rational moistening parameters.

Key words: coal mine, aerological risk levels, methane, coal dust, mine ventilation schemes and methods, degassing, seam moistening, gas-filled solution, surfactants.

For citation: Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Science-based technological solutions for aerological risks reducing in operating and designing coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(2):139-151. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_139.

Введение

Методология оценки аэрологических рисков шахт включает фоновую составляющую, к которой относят горно-геологические характеристики разрабатываемых пластов, и системную составляющую, к которой относят горнотехнические условия отработки угольных пластов. С одной стороны, происходит постоянное усложнение горно-геологических условий, вызванное увеличением глубины разработки угольных пластов, с другой стороны, увеличивается интенсификация добычи угля, обеспеченная возможностями современной добычной техники [1, 2]. Это приводит к возникновению новых взаимодействий фоновых и системных факторов при реализации аэрологических рисков аварий в угольных шахтах и

требует применения комплексных, многофункциональных технологических решений по обеспечению аэрологической безопасности угольных шахт [3 – 5].

Аэрологические риски I, II и III рангов в угольных шахтах

К мероприятиям по борьбе с газовым фактором относятся: вентиляция (схемы проветривания с полным обособленным развевание вредностей по источникам их поступления в шахтную атмосферу), заблаговременная дегазация массива, предварительная дегазация пласта, опережающая отработка защитных пластов, каптирование метана, газодренаж, газотсос и др. [6 – 8]. К мероприятиям по борьбе с пылевым фактором относятся: предварительное увлажнение массива,

орошение мест разрушения и погрузки горной массы (давлением не менее 1,5 МПа) с применением смачивателей, водяные, водовоздушные, туманообразующие, лабиринтно-тканевые завесы, осланцевание выработок, сланцевые и водяные заслоны и др. [9–11].

В табл. 1 представлены результаты оценки степени аэрологического риска I ранга для сверхкатегорных шахт и шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа для разных вентиляционных режимов, которые отражают наиболее благоприятные (наименьшее пылевых деление, малая депрессия шахты, малая

степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентилятора главного проветривания, устойчивая совместная работа вентиляторов главного проветривания, наличие резерва шахты по воздуху и малые внешние утечки) и неблагоприятные условия, характеризующиеся наибольшими значениями показателей, перечисленных в скобках, определяющих факторов. Для выполнения такой оценки были произведены расчеты значений аэрологического риска I ранга для шахты в целом с помощью коэффициентов опасности возникновения аварий и уяз-

Таблица 1

Результаты оценки степени аэрологического риска I ранга при отработке пластов, склонных к горным ударам и самовозгораниям
The results of assessing the 1st rank aerological risk degree during the development of seams prone to rock bumps and spontaneous combustion

Категория устойчивости	Степень аэрологического риска I ранга								
	фланговая схема			комбинированная схема			центрально-сдвоенная схема		
	всасывающий способ	комбинированный способ	нагнетательный способ	всасывающий способ	комбинированный способ	нагнетательный способ	всасывающий способ	комбинированный способ	нагнетательный способ
Сверхкатегорные шахты									
1 категория	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	0,15–0,3
	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
2 категория	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3
	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
3 категория	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,3–0,5	0,3–0,5	0,3–0,5
	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
Шахты, опасные по внезапным выбросам угля и газа									
1 категория	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	0,15–0,3	0,15–0,3
	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
2 категория	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3
	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
3 категория	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,3–0,5	0,3–0,5	0,3–0,5	0,3–0,5	0,3–0,5
	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
Степень (значение) риска: < 0,15 – малая; 0,15–0,3 – умеренная; 0,3–0,5 – большая; > 0,5 – аварийная ситуация									

вимости схем и способов вентиляции шахты.

Полученные расчетные значения риска были разбиты на диапазоны и представлены в табл. 1 в виде так называемой тепловой карты для получения визуальной аналитики [12].

Категории устойчивости вентиляции используются для оценки рисков всех рангов, где самая высокая устойчивость проветривания принадлежит первой категории, а самая низкая — третьей. Устойчивость проветривания определяется наличием диагоналей, имеющих место как для схем вентиляции выемочного участка, так и для крыла и шахты в целом.

Анализ данных табл. 1 показывает, что при благоприятных фоновых показателях аэрологического риска его степень варьируется от малой до умеренной, и лишь для шахт с устойчивостью проветривания третьей категории, опасных по внезапным выбросам угля и газа, степень риска достигает большой степени. При неблагоприятных условиях даже для шахт с высокой степенью устойчивости степень риска чрезвычайно высокая и достигает аварийной ситуации.

Аналогично для оценки степени аэрологического риска II ранга также учитывались наиболее благоприятные (наименьшее пылевыделение, малая депрес-

Таблица 2

Результаты оценки степени аэрологического риска II ранга при отработке пластов, склонных к горным ударам и самовозгораниям

The results of assessing the 2 rank aerological risk degree during the development of seams prone to rock bumps and spontaneous combustion

Категория устойчивости	Степень аэрологического риска II ранга					
	фланговая схема			центрально-сдвоенная схема		
	всасывающий способ	комбинированный способ	нагнетательный способ	всасывающий способ	комбинированный способ	нагнетательный способ
Сверхкатегорные шахты						
1 категория	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15
	0,3–0,5	0,3–0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
2 категория	<0,15	<0,15	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3
	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
3 категория	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,3–0,5
	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
Шахты, опасные по внезапным выбросам угля и газа						
1 категория	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15
	0,3–0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
2 категория	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3	0,15–0,3
	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
3 категория	0,15–0,3	0,3–0,5	0,3–0,5	0,3–0,5	0,3–0,5	0,3–0,5
	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5	>0,5
Степень (значение) риска: < 0,15 — малая; 0,15–0,3 — умеренная; 0,3–0,5 — большая; > 0,5 — аварийная ситуация						

сия откаточного и вентиляционного магистральных штреков, малая тепловая депрессия наклонных выработок, малая степень влияния вентиляционных сооружений на устойчивость проветривания) и неблагоприятные условия (табл. 2).

Анализ данных табл. 2 показывает, что при благоприятных фоновых показателях аэрологического риска его степень так же, как и для риска I ранга, варьируется от малой до умеренной, и лишь для шахт с устойчивостью проветривания третьей категории, опасных по внезапным выбросам угля и газа, риск достигает большой степени. Для неблагоприятных условий степень риска чрезвычайно высокая и достигает аварийной ситуации, однако для шахт с первой катего-

рией устойчивости проветривания для всасывающего способа проветривания степень риска большая, но не достигает аварийной ситуации, что можно объяснить меньшим значением ущерба от отказов вентиляции крыла шахты по сравнению с ущербом от отказов вентиляции шахты.

Анализ данных табл. 3 показывает, что даже при благоприятных горно-геологических условиях разработки угольных пластов степень риска достигает аварийной ситуации для возвратноточных схем вентиляции с последовательным разбавлением вредностей по источникам поступления. В случае неблагоприятных условий для прямоточных и комбинированных схем вентиляции с

Таблица 3

Результаты оценки степени аэрологического риска III ранга при отработке пластов, склонных к горным ударам и самовозгораниям

The results of assessing the 3 rank aerological risk degree during the development of seams prone to rock bumps and spontaneous combustion

Степень устойчивости проветривания как при нормальных, так и при аварийных режимах	Степень аэрологического риска III ранга						
	прямоточная схема			комбинированная схема	возратноточная схема		
	полное разбавление вредностей	частичное разбавление вредностей	последовательное разбавление вредностей		полное разбавление вредностей	частичное разбавление вредностей	последовательное разбавление вредностей
Сверхкатегорные шахты							
Отсутствие диагоналей, коэффициент устойчивости >15	<0,15	0,15–0,3	0,3–0,5	<0,15	0,15–0,3	0,3–0,5	>0,5
	<0,15	0,3–0,5	>0,5	0,15–0,3	0,3–0,5	>0,5	>0,5
Наличие диагоналей, неустойчивое проветривание	0,15–0,3	0,3–0,5	>0,5	0,15–0,3	0,3–0,5	>0,5	>0,5
	0,3–0,5	>0,5	>0,5	0,3–0,5	>0,5	>0,5	>0,5
Шахты, опасные по внезапным выбросам угля и газа							
Отсутствие диагоналей, коэффициент устойчивости >15	<0,15	0,15–0,3	>0,5	<0,15	0,15–0,3	>0,5	>0,5
	<0,15	0,3–0,5	>0,5	0,3–0,5	0,3–0,5	>0,5	>0,5
Наличие диагоналей, неустойчивое проветривание	0,15–0,3	>0,5	>0,5	0,15–0,3	0,3–0,5	>0,5	>0,5
	0,3–0,5	>0,5	>0,5	0,3–0,5	>0,5	>0,5	>0,5
Степень (значение) риска: < 0,15 – малая; 0,15–0,3 – умеренная; 0,3–0,5 – большая; > 0,5 – аварийная ситуация							

полным разбавлением вредностей степень риска удастся не доводить до аварийной ситуации.

Общий анализ данных табл. 1–3 показывает, что аэрологические риски всех рангов в большей степени определяются фоновыми показателями (газоносностью пластов, склонностью к самовозгоранию, горным ударам, пылеобразующей способностью и др.) [13–15], чем системными факторами (способами и схемами вентиляции, газообильностью участка, нагрузкой на очистной забой и др.), что наводит на мысль, что наиболее эффективными мероприятиями по снижению аэрологических рисков будут два вида мероприятий: региональные (заблаговременные, управляющие свойствами и состоянием угольного массива до его отработки) [16–18] и локальные (технологические мероприятия, не допускающие образования взрывоопасных концентраций газа и пыли) [19–21]. Особенно важна роль и эффективность таких технологий для снижения рисков III ранга для выемочных участков и подготовительных выработок. В качестве такой технологии предлагается обработка угольного пласта газонаполненными растворами ПАВ для снижения пылевой и газовой опасностей на выемочных участках.

Технология обработки угольного пласта газонаполненными растворами ПАВ

Суть предлагаемого комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах заключается в том, что предварительное увлажнение угольного массива производится не чистой водой, а трехкомпонентным раствором рабочей жидкости, включающей воду, ПАВ и газ. Как известно, увлажнение угольного массива чистой водой является малоэффективным из-за низкой смачиваемости поверхности угля и

неравномерности распределения нагнетаемой жидкости в пласте, поэтому для повышения смачиваемости угля в воду добавляют ПАВ. Для повышения равномерности увлажнения массива нами предлагается использовать механизм расклинивающего действия газа в микропорах переменного диаметра при движении газожидкостных смесей в пористых средах.

Известно небольшое число работ, посвященных замещению метана угольных пластов другими газами [16]. По механизму физической адсорбции весьма слабо адсорбируются с углем азот и инертные газы: гелий, аргон, криптон, ксенон. Напротив, диоксид углерода адсорбируется углем гораздо лучше, чем метан, поэтому вытеснение метана в угольном пласте диоксидом углерода происходит как из фильтрующего, так из сорбционного объема угля. Однако содержание диоксида углерода в горных выработках строго нормируется Правилами безопасности в отличие от азота, содержание которого не нормируется, что явилось определяющим при выборе рабочего газа. Таким образом, рабочая жидкость состояла из растворенного азота в водном растворе ПАВ.

Увлажнение массива газонаполненными растворами сопровождается совместным движением двух фаз по капиллярам. Такой режим течения по капиллярам можно определить как пузырьковый режим, который имеет место при малых газосодержаниях потока и характеризуется движением газа в виде отдельных, малых по сравнению с радиусом капилляра, пузырей.

Газожидкостная смесь с добавками ПАВ, закачиваемая в пласт под высоким давлением, перемещаясь по трещинам и макропорам, будет увеличивать их гидропроводность и вытеснять находящийся в них свободный метан. После прекращения закачки газожидкостного

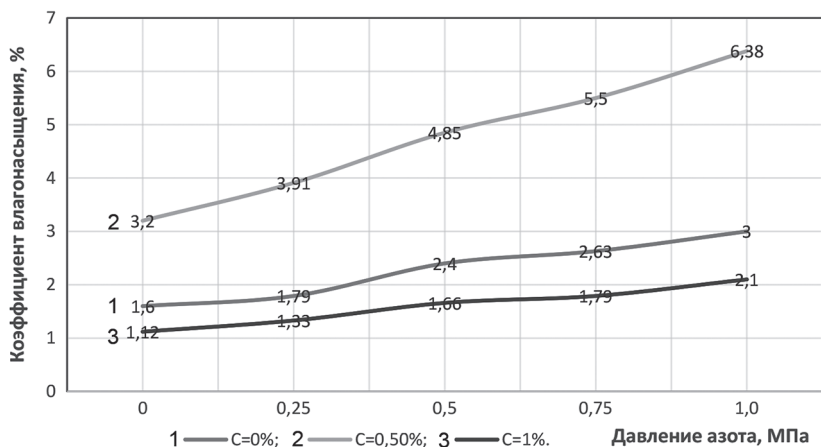


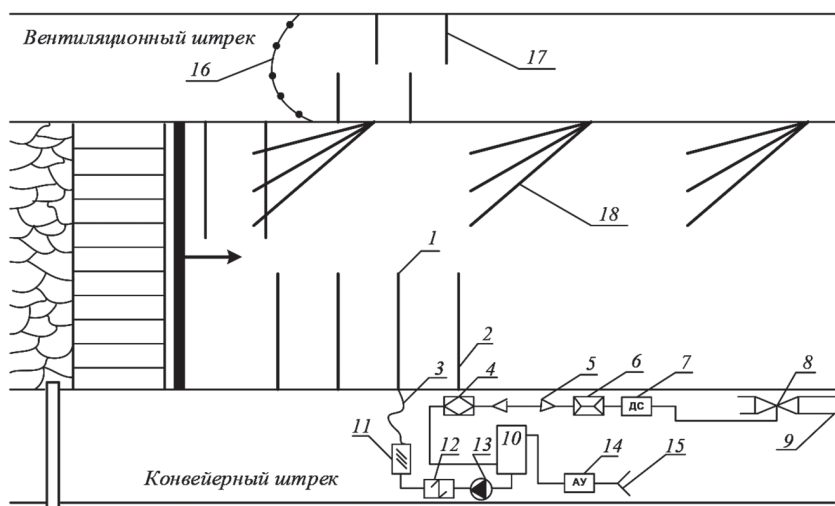
Рис. 1. Зависимость коэффициента влагонасыщения угля от давления азота

Fig. 1. Dependence between the moisture saturation coefficient of coal and nitrogen pressure

раствора ПАВ и снятия давления с поверхности скважин блокированные жидкостью метан и азот оказываются под действием капиллярных сил. Капиллярная пропитка является функцией давления Лапласа. Для проникновения сма-

чивающей жидкости в микропористую структуру угля необходимо, чтобы капиллярное давление превышало пластовое.

Для определения рациональных параметров обработки пластов газонаполненными растворами ПАВ были проведе-



- 1 – скважина, 2 – герметизатор, 3 – шланг гибкий, высоконапорный, 4 – фильтр штрековый, 5 – переходник, 6 – клапан редукционный, 7 – дозатор-смачиватель, 8 – вентиль, 9 – пожарно-оросительный трубопровод, 10 – смеситель взрывобезопасного исполнения, 11 – расходомер, 12 – реле давления, 13 – установка для нагнетания раствора УНР-02, 14 – азотная установка мембранного типа взрывобезопасного исполнения, 15 – воздухозаборник, 16 – водяная завеса, 17 – тканевые лабиринты, 18 – дегазационные скважины

Рис. 2. Технологическая схема обработки пласта газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ

Fig. 2. Technological scheme of coal seam treatment with gas-filled solutions of surfactants

Таблица 4

Параметры увлажнения пласта газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ**Parameters of reservoir moistening with gas-filled solutions of surfactants**

Наименование параметров	Значение	Наименование параметров	Значение
Длина скважины, м	111	Время нагнетания раствора в скважину, ч	60,93
Длина лавы, м	242	Количество инертного газа, необходимое для обработки	5820 л 7,28 кг
Глубина герметизации скважины, м	10	Количество баллонов с инертным газом, шт	0,97
Расстояние между скважинами, м	20	Количество смачивателя, необходимое на одну скважину, л	603
Количество раствора, закачиваемое в скважину, м ³	201	Концентрация смачивателя, %	0,3

ны лабораторные исследования (рис. 1) по увлажнению угля пласта Е-5 (марка Ж) растворами (объем каждого раствора 100 мл) с концентрациями ПАВ 0; 0,5; 1,0%. Увлажнение под давлением газа производилось в автоклаве объемом 1000 мл при следующих давлениях азота: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 МПа. Для каждой вариации опыта был подготовлен отдельный кусок угля, массой около 20 г. Время эксперимента для каждой пробы угля составляло 60 мин.

Максимальное приращение влажности составляет 6,38% при концентрации смачивателя 0,5% и давлении азота 1,0 МПа. По данным рис. 1 были получены корреляционные уравнения для экстраполяции значений коэффициента влагонасыщения.

Рекомендуемыми параметрами при увлажнении угольных пластов газонаполненными растворами ПАВ установлены: концентрация ПАВ 0,2÷0,5%; давление азота 1,0÷2,0 МПа.

Авторами разработана методика обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ, включающая использование рациональных параметров увлажнения, и «Технологическая часть промышлен-

ных испытаний пылесвязывающего действия обработки угольного массива газонаполненными растворами ПАВ» (см. рис. 2). Основные параметры воздействия газонаполненных растворов ПАВ на угольный пласт для снижения его пылеобразующей способности представлены в табл. 4.

На основании разработанных рекомендаций по снижению пылеобразующей способности пластов от концентрации смачивателя в скважины рекомендуется подавать водный раствор смачивателя с концентрацией 0,2%. Раствор можно закачать насосом УНР-02 под давлением 20 МПа (темп нагнетания раствора — 35 л/мин). Расчетное количество воды, закачиваемое в скважину, составляет 1,67 м³, продолжительность времени нагнетания жидкости в скважину — 0,8 ч.

Заключение

Взрывы газа и пыли представляются большую опасность для угольных шахт и характеризуются своими катастрофическими последствиями [22, 23]. Возникшие взрывы пылегазовоздушных смесей на выемочных участках могут привести к отказам вентиляции крыла и шахты в целом.

Из анализа представленных авторами расчетных данных следует, что наиболее эффективными мероприятиями по снижению аэрологических рисков всех рангов будут региональные (заблаговременные, управляющие свойствами и состоянием угольного массива до его отработки), влияющие на эффективность работы единой вентиляционно-дегазационной системы, и локальные технологические мероприятия, не допускающие образования взрывоопасных концентраций газа и пыли.

В качестве такого локального технологического мероприятия предлагается комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей на выемочных участках, реализуемый в виде комплексного способа увлажнения угольных пластов газонаполненными растворами. Способ может быть использован для воздействия на угольный пласт с целью снижения его пылеобразующей способности

и газовой выделения, а также повышения эффективности пылеулавливания при отбойке угля [24–26].

После насыщения угольного массива газонаполненным раствором ПАВ в течение 24–96 ч массив разрушают, например, рабочим органом комбайна, и орошают водой, после чего высвобожденный газ и метан взаимодействуют с пенообразователем и образуют воздушно-механическую пену, которая изолирует отбитый уголь в объеме разрушенной горной массы, снижая пылегазовыделения в атмосферу горной выработки.

Повышение интенсивности выемки угля приводит к возрастанию доли газовой выделения из отбитого угля. Использование газонаполненных растворов ПАВ позволяет блокировать выделение газа и пыли как с обнаженной поверхности разрабатываемого пласта, так и из отбитого угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кубрин С. С., Решетняк С. Н., Загоршменный И. М., Карпенко С. М. Имитационное моделирование режимов работы оборудования комплексно-механизированного забоя угольной шахты // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 286–294. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-286-294.
2. Босиков И. И., Ключев Р. В., Хетагуров В. Н. Анализ и комплексная оценка газодинамических процессов на угольных шахтах с помощью методов теории вероятности и математической статистики // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 461–467. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467.
3. Kabanov E. I., Korshunov G. I., Magomet R. D. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dust-air mixtures in underground workings // Journal of Applied Science and Engineering. 2020, vol. 24, no. 1, pp. 105–110. DOI: 10.6180/jase.202102_24(1).0014.
4. Wang G., Ren H., Zhao G. Zhang D., Wen Zh., Meng L., Gong Sh. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China // International Journal of Coal Science & Technology. 2022, vol. 9, article 24. DOI: 10.1007/s40789-022-00491-3.
5. Ли Сяньгун, Ли Юй, Фа Цывэй, Алам Асар Оценка риска аварий с выбросами угля и газа на угольных шахтах на основе факторного анализа и логистической регрессии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10-1. — С. 116–127. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_116.
6. Босиков И. И., Ключев Р. В., Аймбетова И. О., Махошева С. А. Оценка и анализ аэродинамических параметров воздушных потоков для эффективного выбора схем воздухообеспечения в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 397–405. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405.

7. *Yueze L., Akhtar S., Sasmito A. P., Kurnia J. C.* Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 4, pp. 657 – 662. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.019.

8. *Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S. M.* Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation // *Tunneling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 89, pp. 68 – 77. DOI: 10.1016/j.tust.2019.03.022.

9. *Филин А. Э., Курносков И. Ю., Колесникова Л. А., Овчинникова Т. И., Колесников А. С.* К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты // *Уголь*. – 2022. – № 9. – С. 67 – 72. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72.

10. *Kornev A. V., Korshunov G. I., Kudelas D.* Reduction of dust in the longwall faces of coal mines: Problems and perspective solutions // *Acta Montanistica Slovaca*. 2021, vol. 26, no. 1, pp. 84 – 97. DOI: 10.46544/AMS.v26i1.07.

11. *Корнев А. В., Ледяев Н. В., Кабанов Е. И., Корнева М. В.* Оценка прогнозной запыленности в забоях угольных шахт с учетом особенностей смачиваемости угольной пыли // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 6-2. – С. 115 – 134. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.

12. *Жолманов Д. К., Зиновьева О. М., Меркулова А. М., Смирнова Н. А.* Оценка эффективности системы управления рисками на горнодобывающих предприятиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 10. – С. 166 – 176. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_166.

13. *Zhu S., Feng Y., Jiang F., Liu J.* Mechanism and risk assessment of overall-instability-induced rockbursts in deep island longwall panels // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 106, pp. 342 – 349. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.031.

14. *Cheng C., Cheng X. Y., Yu R., Yue W. P., Liu C.* The law of fracture evolution of overlying strata and gas emission in goaf under the influence of mining // *Geofluids*. 2021, vol. 6, article 2752582. DOI: 10.1155/2021/2752582.

15. *Ning J. G., Wang J., Tan Y. L., Xu Q.* Mechanical mechanism of overlying strata breaking and development of fractured zone during close-distance coal seam group mining // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 2, pp. 207 – 215. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.03.001.

16. *Slastunov S., Kolikov K., Batugin A., Sadov A., Khahtiev A.* Improvement of intensive in-seam gas drainage technology at Kirova Mine in Kuznetsk Coal Basin // *Energies*. 2022, vol. 15, no. 3, article 1047. DOI: 10.3390/en15031047.

17. *Шулятьева Л. И., Майорова Л. В.* Моделирование параметров и организация процесса дегазации выемочных полей угольных шахт // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 8. – С. 168 – 179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_168.

18. *Куликова Е. Ю.* Методика интегральной оценки риска в шахтном и подземном строительстве // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 2-1. – С. 124 – 133. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133.

19. *Shi L., Wang J., Zhang G., Cheng X., Zhao X.* A risk assessment method to quantitatively investigate the methane explosion in underground coal mine // *Process Safety and Environmental Protection*. 2017, vol. 107, pp. 317 – 333. DOI: 10.1016/j.psep.2017.02.023.

20. *Li Y., Su H., Ji H., Cheng W.* Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas. A case study of Xutuan Colliery // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 6, pp. 875 – 882. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.07.007.

21. *Rodionov V., Tumanov M., Skripnik I., Kaverzneva T., Pshenichnaya C.* Analysis of the fractional composition of coal dust and its effect on the explosion hazard of the air in coal mines // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 981, no. 3, article 032024. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032024.

22. *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.

23. Тарасенко И. А., Куликова А. А., Ковалева А. М. К вопросу оценки автоматизации контроля параметров метановоздушной смеси // Уголь. – 2022. – № 11. – С. 84–88. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-11-84-88.

24. Du W., Li H., Qi Q., Zheng W., Yang S. Research on multifactor analysis and quantitative evaluation method of rockburst risk in coal mines // Lithosphere. 2022, special 11. DOI: 10.2113/2022/5005317.

25. Lu Gao, Xiangtao Kang, Meng Tang, Jinguo Hu, Jiachi Ren, Cunliu Zhou Study on prediction of outburst risk of excavation face by initial gas emission // Geofluids. 2022, vol. 2022, article 4866805. DOI: 10.1155/2022/4866805.

26. 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, pp. 1–9. DOI: 10.1155/2021/5574579. [PMID](#)

REFERENCES

1. Kubrin S. S., Reshetnyak S. N., Zakorshmeny I. M., Karpenko S. M. Simulation modeling of equipment operating modes of complex mechanized coal mine face. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 286–294. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-286-294.

2. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Khetagurov V. N. Analysis and comprehensive evaluation of gas-dynamic processes in coal mines using the methods of the theory of probability and math statistics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 461–467. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467.

3. Kabanov E. I., Korshunov G. I., Magomet R. D. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dust-air mixtures in underground workings. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2020, vol. 24, no. 1, pp. 105–110. DOI: 10.6180/jase.202102_24(1).0014.

4. Wang G., Ren H., Zhao G. Zhang D., Wen Zh., Meng L., Gong Sh. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022, vol. 9, article 24. DOI: 10.1007/s40789-022-00491-3.

5. Li Xiangong, Li Yu, Fa Ziwei, Alam Easar. Risk assessment of coal and gas outburst accidents in coal mines based on factor analysis and logistic regression. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10-1, pp. 116–127. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_116.

6. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Aimbetova I. O., Makhosheva S. A. Assessment and analysis of aerodynamic parameters of air flows for effective selection of air supply schemes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 3, pp. 397–405. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405.

7. Yuezhe L., Akhtar S., Sasmito A. P., Kurnia J. C. Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 4, pp. 657–662. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.019.

8. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S. M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 89, pp. 68–77. DOI: 10.1016/j.tust.2019.03.022.

9. Filin A. E., Kurnosov I. Yu., Kolesnikova L. A., Ovchinnikova T. I., Kolesnikov A. S. Description of the methodology for conducting an experiment on dust deposition of mining and metallurgical production. *Ugol'*. 2022, no. 9, pp. 67–72. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72.

10. Kornev A. V., Korshunov G. I., Kudelas D. Reduction of dust in the longwall faces of coal mines: Problems and perspective solutions. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021, vol. 26, no. 1, pp. 84–97. DOI: 10.46544/AMS.v26i1.07.

11. Kornev A. V., Ledyayev N. V., Kabanov E. I., Korneva M. V. Estimation of predictive dust content in the faces of coal mines taking into account the peculiarities of the wettability of coal dust. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 115 – 134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.
12. Zholmanov D. K., Zinovieva O. M., Merkulova A. M., Smirnova N. A. Assessment of risk management efficiency in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10, pp. 166 – 176. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_166.
13. Zhu S., Feng Y., Jiang F., Liu J. Mechanism and risk assessment of overall-instability-induced rockbursts in deep island longwall panels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 106, pp. 342 – 349. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.031.
14. Cheng C., Cheng X. Y., Yu R., Yue W. P., Liu C. The law of fracture evolution of overlying strata and gas emission in goaf under the influence of mining. *Geofluids*. 2021, vol. 6, article 2752582. DOI: 10.1155/2021/2752582.
15. Ning J. G., Wang J., Tan Y. L., Xu Q. Mechanical mechanism of overlying strata breaking and development of fractured zone during close-distance coal seam group mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 2, pp. 207 – 215. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.03.001.
16. Slastunov S., Kolikov K., Batugin A., Sadov A., Khautiev A. Improvement of intensive in-seam gas drainage technology at Kirova Mine in Kuznetsk Coal Basin. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 3, article 1047. DOI: 10.3390/en15031047.
17. Shulyatieva L. I., Mayorova L. V. Parametric modeling and arrangement of gas drainage in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 8, pp. 168 – 179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_168.
18. Kulikova E. Yu. Methods of forming an integral risk assessment in mine and underground construction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 124 – 133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133.
19. Shi L., Wang J., Zhang G., Cheng X., Zhao X. A risk assessment method to quantitatively investigate the methane explosion in underground coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017, vol. 107, pp. 317 – 333. DOI: 10.1016/j.psep.2017.02.023.
20. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas. A case study of Xutuan Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 6, pp. 875 – 882. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.07.007.
21. Rodionov V., Tumanov M., Skripnik I., Kaverzneva T., Pshenichnaya C. Analysis of the fractional composition of coal dust and its effect on the explosion hazard of the air in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 981, no. 3, article 032024. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032024.
22. 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.
23. Tarasenko I. A., Kulikova A. A., Kovaleva A. M. On the issue of assessing the automation of control of the parameters of the methane-air mixture. *Ugol'*. 2022, no. 11, pp. 84 – 88. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-11-84-88.
24. Du W., Li H., Qi Q., Zheng W., Yang S. Research on multifactor analysis and quantitative evaluation method of rockburst risk in coal mines. *Lithosphere*. 2022, special 11. DOI: 10.2113/2022/5005317.
25. Lu Gao, Xiangtao Kang, Meng Tang, Jinguo Hu, Jiachi Ren, Cunliu Zhou Study on prediction of outburst risk of excavation face by initial gas emission. *Geofluids*. 2022, vol. 2022, article 4866805. DOI: 10.1155/2022/4866805.
26. 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, pp. 1 – 9. DOI: 10.1155/2021/5574579.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Баловцев Сергей Владимирович¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: balovcev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0961-6050,

Скопинцева Ольга Васильевна¹ — д-р техн. наук,

профессор, e-mail: skopintseva54@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7257-8720,

¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Баловцев С.В., e-mail: balovcev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.V. Balovtsev¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: balovcev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0961-6050,

O.V. Skopintseva¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: skopintseva54@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7257-8720,

¹ National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: S.V. Balovtsev, e-mail: balovcev@yandex.ru.

Получена редакцией 19.12.2022; получена после рецензии 20.12.2022; принята к печати 10.01.2023.

Received by the editors 19.12.2022; received after the review 20.12.2022; accepted for printing 10.01.2023.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ В ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «ПАРНЫЕ ШТРЕКИ»

(2022, № 12, СВ 8, 16 с. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_8_3)

Титов Николай Викторович¹ — д-р техн. наук, профессор, ORCID ID: 0000-0001-5743-2435,

Иванов Сергей Иванович¹ — ассистент, e-mail: s_i_ivanov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6951-8313,

Шурыгин Дмитрий Николаевич¹ — д-р техн. наук, e-mail: shurygind@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6951-8313.

¹ ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова.

Представлены комплексные исследования по оптимизации параметров податливого антрацитового целика в геомеханической системе «парные штреки», включающие численное моделирование, основанное на методе конечных элементов. Для решения геомеханической задачи применен метод планирования эксперимента. По результатам исследований установлен порядок формирования податливости целика, определены оптимальные параметры целика, влияющие на его податливость и несущую способность.

Ключевые слова: опорное давление, парные штреки, податливый целик, охрана выемочных выработок, антрацитовый пласт.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF REFERENCE PRESSURE AT DIFFERENT STAGES OF ITS FORMATION IN THE GEOMECHANICAL SYSTEM «PAIR DRILLS»

N.V. Titov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, S.I. Ivanov¹, Assistant, D.N. Shurygin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

¹ M. I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 346428, Novocherkassk, Russia.

The article presents comprehensive studies on optimizing the parameters of a pliable anthracite pillar in the geomechanical system «pair drifts», including numerical modeling based on the finite element method. To solve the geomechanical problem, the experiment planning method was applied. According to the results of the research, the procedure for the formation of the compliance of the pillar was established, the optimal parameters of the pillar, affecting its compliance and bearing capacity, were determined.

Key words: bearing pressure, paired drifts, pliable pillar, protection of excavation workings, anthracite seam.