

## ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА РАБОТНИКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОГЕЛЯ

А.В. Корнев<sup>1</sup>, А.А. Спицын<sup>1</sup>, Г.И. Коршунов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Kornev\_AV@pers.spmi.ru

**Аннотация:** С повышением производительности угледобывающих предприятий происходит ухудшение пылевой обстановки на рабочих местах и обостряются вопросы обеспечения безопасности труда по пылевому фактору. Ежегодно органами Ростехнадзора на угольных шахтах выявляется более 4500 тыс. нарушений, значительная часть которых связана с организацией и проведением мероприятий пылевзрывозащиты. В частности, не соблюдаются периодичность и норма осланцевания горных выработок, что вызвано высокой трудоемкостью данной процедуры, а также дефицитом трудовых, транспортных и энергетических ресурсов на предприятиях. Некачественное проведение мероприятий пылевзрывозащиты и ненадлежащий контроль за их эффективностью чреваты угрозой взрыва пылевоздушной или пылеметановоздушной смеси, сопровождаемого, как правило, групповым смертельным травматизмом, что неоднократно было подтверждено статистикой аварийности на угольных шахтах. С целью повышения безопасности труда работников по пылевому фактору предлагается в горных выработках с интенсивностью пылеотложения от 1,2 до 13 г/м<sup>3</sup>·сут процедуру осланцевания заменить на обработку выработок 4%-м гидрогелем, что позволит сократить периодичность мероприятий пылевзрывозащиты, увеличив их надежность и продолжительность «защитного эффекта», снизить физическую и пылевую нагрузку на работников. Приведены результаты лабораторных и шахтных исследований по определению химических, адгезионных, влагоудерживающих и пылеулавливающих свойств гидрогеля, подтверждающих безопасность, возможность и целесообразность его применения в качестве альтернативного осланцеванию способа пылевзрывозащиты для ряда горных выработок.

**Ключевые слова:** безопасность труда, угольные шахты, пылевой фактор, пылевзрывозащита, осланцевание, суперабсорбент, гидрогель, пылевая динамика, пыле- и влагоудерживающий эффект.

**Для цитирования:** Корнев А. В., Спицын А. А., Коршунов Г. И. Повышение безопасности труда работников угольных шахт по пылевому фактору на основе использования гидрогеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 4. – С. 5–22. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_4\_0\_5.

---

## Enhancement of occupational safety in coal mines with respect to dust factor using hydrogel

A.V. Kornev<sup>1</sup>, A.A. Spitsyn<sup>1</sup>, G.I. Korshunov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,  
e-mail: Kornev\_AV@pers.spmi.ru

---

**Abstract:** As productivity of coal mines grows, dust conditions at work places worsen and occupational safety by the dust criterion aggravates. Rostekhnadzor agencies annually reveal more than 4500 thousand violations mostly connected with organization and implementation of dust and explosion protection measures in coal mines. In particular, neither frequency no rates of settling coal dust with powdered slate are observed due to a high labor content of the procedure, as well as owing to the lack of labor, transport and energy resources in mines. Substandard dust and explosive protection and improper compliance control is fraught with the risks of explosion of dust-and-air or dust-and-methane-and-air mixtures, which is accompanied with trauma deaths, and this fact is many times confirmed by the accident statistics in coal mines. In order to enhance occupational safety with respect to the dust criterion in mine roadways with the daily rate of dust deposition from 1.2 to 13 g/m<sup>3</sup>, it is proposed to replace the procedure of coal dust settling with powdered slate by treatment of roadways with 4% hydrogel. This can reduce the frequency of dust and explosion protection activities, increase the reliability and duration of the protection effect, and low the physical and dust load on mine personnel. This article describes the lab-sale and mine research results on determination of chemical, adhesion, water retention and dust catching properties of hydrogel. These results prove safety, advisability and applicability of hydrogel as an alternative to coal dust settling with powdered slate in dust and explosion protection in some mine openings.

**Key words:** occupational safety, coal mines, dust factor, dust and explosion protection, coal dust settling with powdered slate, superabsorbent, hydrogel, dust dynamics, dust catching and water retention effect.

**For citation:** Kornev A. V., Spitsyn A. A., Korshunov G. I. Enhancement of occupational safety in coal mines with respect to dust factor using hydrogel. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(4):5-22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_4\_0\_5.

---

### Введение

Угольная отрасль является одной из динамично развивающихся отраслей минерально-сырьевого комплекса, несмотря на непростую конъюнктуру мирового рынка [1]. Обеспечение ее устойчивости является важнейшей задачей государственного масштаба, которую невозможно решить без сохранения и повышения надежности функционирования наиболее важного ресурса — человеческого. Сохранение жизни и здоровья работников остается главным приоритетом при ор-

ганизации и ведении производственной деятельности.

Наиболее высокие показатели профзаболеваемости и травматизма, в т.ч. смертельного, фиксируются на рабочих местах горнодобывающих предприятий, и в отдельности — угольной отрасли [2]. Одним из основных видов профзаболеваний, выявляемых среди работников, являются заболевания органов дыхания, представленные по большей части пневмокониозами, хронической обструктивной болезнью легких и пылевыми брон-

хитами — 69,56% случаев. В России повышенная профзаболеваемость отмечается среди работников Кемеровской области (Кузбасса), где большая часть жителей (67,5%) трудится на предприятиях по добыче и обогащению угля [3, 4].

С повышением производительности угледобывающих предприятий, которая в 2023 г. достигла 430,0/438,7 млн т угля (по данным Росстата и угледобывающих компаний соответственно) [1], происходит ухудшение пылевой и газовой обстановки на рабочих местах, в связи с чем обостряются вопросы обеспечения безопасности труда по пылевому [5, 6] и аэрологическому факторам [7 – 9]. Вопрос снижения запыленности атмосферы и пылевых нагрузок на работников актуален не только для угольных шахт, разрезов и обогатительных фабрик, но также для иных горно-обогатительных комплексов.

С целью нормализации пылевой обстановки, повышения эффективности производства ведутся исследования по различным направлениям:

- выявление закономерностей протекания процессов массопереноса в угольном массиве и при его разрушении [10, 11];
- изучение пылединамических процессов при добыче, транспортировке и складировании углей [12 – 14];
- снижение пылевыделений за счет оптимизации добычных механизированных [15] и буровзрывных работ [16, 17];
- разработка более эффективных пылесмачивающих [18, 19] и пылесвязывающих составов [20, 21];
- разработка альтернативных средств борьбы с пылью [22, 23];
- исследование влияния параметров систем орошения, температуры распыляемых смачивателей или воды на эффективность пылеподавления [24, 25];
- совершенствование систем и приборов пылегазового контроля [26, 27].

Приведенные мероприятия не только положительно влияют на снижение пылеобразования, но и уменьшают пылевую нагрузку от источников с сокращением объемов пыли, скапливающейся на поверхностях горных выработок. Тем не менее, показатели интенсивности пылеотложения на российских угольных шахтах, более 90% из которых относится к категории пылевзрывоопасных, остаются высокими. Вопросы повышения безопасности труда посредством снижения профессиональных рисков по пылевому фактору не теряют своей актуальности. Обеспечение надежной пылевзрывозащиты является одним из главных инструментов для этого.

Следует отметить, что среди ежегодно выявляемых Ростехнадзором на угольных шахтах нарушений в области промышленной безопасности, общее количество которых в 2022 г. составило 4668 случаев, значительную часть занимают нарушения, связанные именно с организацией и проведением мероприятий пылевзрывозащиты. Одним из характерных нарушений является несоблюдение периодичности и нормы ослабления подземных горных выработок. Некачественная реализация мероприятий пылевзрывозащиты при наложении сопутствующих факторов, как и пренебрежение требованиями аэрологической безопасности, чревато фатальными последствиями — взрывом пылевоздушной или пылеметановоздушной смеси, сопровождаемым разрушением подземных сооружений с находящимися в них людьми, оборудованием и техникой. Компании, как следствие, имеют огромное количество погибших и травмированных, а также многомиллионные убытки [28].

Детальный анализ ситуации в области организации работ по обеспечению пылевзрывобезопасности горных выработок на угольных шахтах позволил выявить некоторые особенности, которые

можно рассматривать в качестве факторов, отрицательно сказывающихся на уровне безопасности труда.

Процедура осланцевания, являющаяся в настоящее время основным мероприятием по недопущению взрыва угольной пыли [29], требует жесткого соблюдения качества и периодичности ее реализации, которая может достигать трех раз в сутки. Объем годового потребления инертной пыли только одной шахтой составляет в среднем от 1700 до 4600 т. Затраты на закупку материала составляют 10,2 – 27,6 млн руб. в год, без учета расходов на транспортировку по горным выработкам и проведение самой процедуры осланцевания. Повышенная периодичность осланцевания выработок требует и увеличения частоты контроля за их состоянием. В условиях дефицита финансовых, временных, энергетических, трудовых или транспортных ресурсов в угледобывающих компаниях создаются предпосылки к нарушениям, сводящимся к несоблюдению должной периодичности осланцевания, уменьшению объемов обработанных выработок или снижению расхода инертной пыли, недостаточному контролю за состоянием пылевзрывозащиты.

В дополнение к сказанному, само осланцевание не способствует снижению концентрации взвешенной в воздухе выработок углепородной пыли, а наоборот. Тот факт, что инертная пыль изготавливается из природного материала – известняка или доломита, и является по сути экологичным средством пылевзрывозащиты, не делает ее безопасной для вдыхания работниками. Попадание в воздушную струю шахтной вентиляционной сети гидрофобизированных частиц карбоната кальция создает дополнительную пылевую нагрузку на органы дыхания горняков, ухудшает видимость, отрицательно сказывается на работе машин и механизмов. Операция загрузки

инертной пыли на внутришахтный транспорт и подача ее в осланцеватель характеризуется повышенной тяжестью труда. Проведение осланцевания вручную, что нередко практикуется на шахтах вследствие невозможности механизации процесса во всех горных выработках, предполагает еще большее увеличение физической нагрузки на работников.

Таким образом, применение инертной пыли, с одной стороны, позволяет предупредить взрывы при соблюдении графика и нормы нанесения, с другой – увеличивает риски травмирования работников и развития заболеваний органов дыхания. При отклонении от порядка и периодичности обработки выработок возрастает риск взрывов угольной пыли и травмирования работников.

Основным недостатком мероприятий гидропылевзрывозащиты (например, обмывки, увлажнения осевшей пыли), используемых для некоторых горных выработок, является высокая скорость испарения воды, что приводит довольно быстро к снижению влажности угольной пыли до критического значения ( $W = 12\%$ ) и требует повторения процедур.

В свете интенсификации процессов добычи угля актуальной задачей представляется разработка мер по повышению безопасности труда работников угольных шахт, направленных на снижение профессиональных рисков, связанных с пылевыми аэрозолями.

По мнению авторов, перспективным средством пылевзрывозащиты подземных горных выработок угольных шахт может стать использование гидрогеля, лишенное недостатков, присущих осланцеванию и обмывке.

Гидрогели – это водные растворы суперабсорбентов-полимеров, главной особенностью которых является их разбухание под действием воды и удержание ее в значительном объеме в течение длительного периода времени. По мере

высыхания гидрогеля и «схлопывания» полимерной цепочки повторное орошение подсохшего слоя переводит его обратно в гелеобразное состояние без ухудшения водоудерживающих или «клеящих» свойств. Такая процедура может повторяться многократно без разрушения структуры полимера. Эти свойства суперабсорбентов привели к широкому их применению в различных областях: в сельском хозяйстве [30], интенсификации процессов нефтедобычи [31], очистке почв и водных ресурсов от нефтепродуктов [32], для предупреждения самовозгораний угля и пожаротушения [33, 34], для борьбы с пылью при складировании и хранении сыпучих материалов [35].

Применение гидрогелей в угольных шахтах позволит улучшить пылевую обстановку и удерживать оседающую взрывоопасную угольную пыль во влажном связанном состоянии, обеспечивая взрывобезопасность обработанных горных выработок с определенной интенсивностью пылеотложения в течение более длительного периода времени по сравнению с осланцеванием или обмывкой.

### **Методика и методы**

По результатам предварительно проведенного анализа суперабсорбентов и готовых гидрогелей, производимых как в России, так и за рубежом, для применения в угольных шахтах был выбран гидрогель отечественного производства на основе полипроп-2-еноата натрия, хлорида аммония и хлорида натрия.

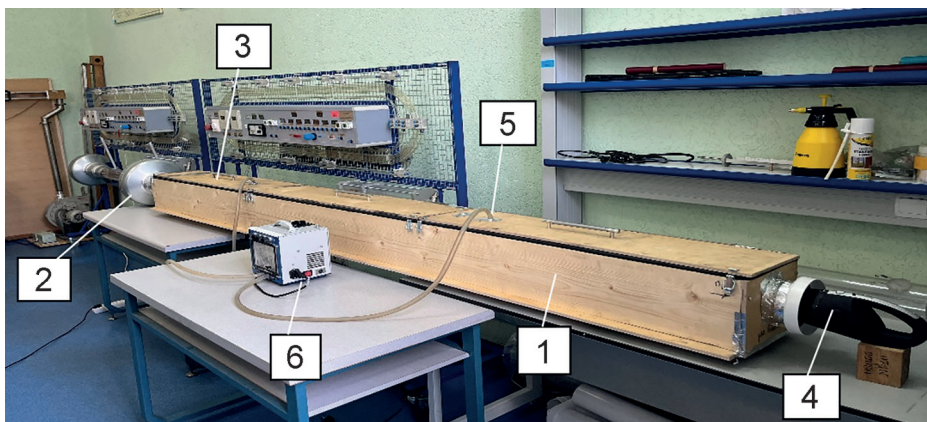
На первоначальном этапе исследований на лабораторной базе Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II был изучен фазовый, качественный и количественный состав проб концентрированного суперабсорбента. Также были определены наиболее важные эксплуатационные характеристики его водных растворов — гидро-

гелей с различной концентрацией основного вещества в них. Исследовались текучесть и адгезия на различных поверхностях; кинетика высыхания проб гидрогелей в смеси со взрывоопасной угольной пылью, масса которой подбиралась исходя из фактических значений интенсивностей пылеотложения в реальных горных выработках; динамическая вязкость. По итогам проведенных исследований, методика и результаты которых более подробно описаны в источнике [36], была обоснована потенциальная возможность использования гидрогеля в вышеуказанных целях и установлена его рациональная концентрация, составившая 4%.

На последующем этапе принципиально важным было исследовать поведение 4%-го гидрогеля на поверхностях выработок при аэродинамических и пылевых нагрузках.

Для исследования процессов пылепереноса и пылеосаждения, а также установления эффективности связывания угольной пыли гидрогелем, нанесенным на поверхности выработки, авторами был разработан лабораторный экспериментальный стенд, представляющий собой физическую модель горизонтальной горной выработки (рис. 1).

Основу стенда составляет деревянный короб квадратного сечения 1 с размерами 0,25×0,25×3 м, на внутренние поверхности которого был нанесен слой эквивалентного материала, состоящего из песка, эпоксидной смолы ЭД-20 и полиэтиленполиамиона, позволившего учесть физико-механические свойства горного массива и шероховатость поверхностей реальных горных выработок. Параметры физической модели выбраны с учетом геометрического, кинематического и аэродинамического (чисел Рейнольдса и Эйлера) критериев подобия. В начале стенда установлен работающий на нагнетание центробежный вентилятор



1 – деревянный короб, облицованный изнутри эквивалентным материалом;  
 2 – вентилятор «DEVENT LT 160»;  
 3 – место установки загрузочного устройства для подачи угольной пыли; 4 – пылесборник;  
 5 – входные отверстия для гибких трубок аспиратора; 6 – аспиратор «АПВ-4»

Рис. 1. Лабораторный стенд по изучению эффективности связывания угольной пыли гидрогелем, процессов пылепереноса и пылеосаждения [составлен авторами]

Fig. 1. Laboratory setup for studying the efficiency of coal dust binding with hydrogel, dust transfer and dust deposition processes [compiled by the authors]

«DEVENT LT 160» 2 с механическим регулятором. На удалении 0,2 м по горизонтали от вентилятора на верхней части стенда располагалось загрузочное устройство с принудительной подачей угольной пыли 3, предварительно отобранной из горных выработок действующей шахты. В конце стенда устанавливался пылесборник 4, служащий для улавливания наиболее мелких и легких частиц угольной пыли, а также очистки воздуха, выбрасываемого в атмосферу лаборатории. С целью фиксирования запыленности внутри стенда по центру сечения устанавливались аллонжи с предварительно взвешенными фильтрами. Через отверстия, проделанные в крышке 5, аллонжи соединялись гибкими трубками с входными штуцерами четырехканального аспиратора «АПВ-4» 6. Запыленность определялась в двух точках: 1 – на расстоянии 0,8 м от начала стенда, 2 – на расстоянии 0,8 м от конца стенда.

Внутри стенда по всей длине на почве была уложена пленка для сбора осаж-

даемой угольной пыли, а также в трех контрольных точках разложены подложки, имеющие размеры 0,15×0,15 м.

Для контроля скорости движения воздуха в стенде использовались приборы «АПР-2» и «ТАММ-20»; измерения создаваемой депрессии, избыточного и атмосферного давлений – воздухомерные трубки Пито, электронный и жидкостный микроанометры – «МБГО-2» и «ММН-2400», и барометр-анероид соответственно. При проведении экспериментов фиксировали с помощью приборов различного принципа действия микроклиматические и атмосферные условия: температуру ( $t_b$ ), относительную влажность воздуха ( $\varphi_b$ ), а также атмосферное давление ( $p_{\text{атм}}$ ). Дополнительно к указанным выше приборам использовали ртутный термометр и термогигрометр «testo 625».

Эксперименты проводились в следующих условиях:  $t_b = 23,5 \pm 0,5$  °C;  $\varphi_b = 21,5 \pm 1\%$ ;  $p_{\text{атм}} = 100,2 \pm 1,5$  кПа.

Методика исследований заключалась в следующем:

1. Проводились расчеты масс навесок угольной пыли, которые подавались в стенд при разных скоростях создаваемого воздушного потока, чтобы интенсивность пылеотложения ( $P_t$ ) внутри модели соответствовала реальным значениям интенсивностей пылеотложения в различных типах горных выработок действующих угольных шахт, и принятых равными 0,1; 1,2; 2,4; 13 и 42,2 г/м<sup>3</sup>·сут.

2. Осуществлялась равномерная подача навесок в течение 10 мин каждая при установлении скорости воздушного потока 0,5, 1, 2, и 4 м/с. Параллельно работал аспиратор с предварительно выставленными расходами воздуха.

3. По окончании загрузки пыли в стенд выключался вентилятор и аспиратор, фильтры с осевшей на них угольной пылью взвешивались. Весовым методом определялась масса пыли, осевшей на каждой из подложек, на почве за исключением подложек, и масса пыли, попавшей в контейнер пылесборника.

4. Проводились расчеты по распределению осевшей угольной пыли на поверхностях выработки (почве, боках и кровле), составлялся баланс поступившей в стенд и осевшей пыли, рассчитывались значения запыленности.

По указанной методике проводились серии из 4 опытов для трех состояний внутренней поверхности стенда: естественной, обработанной гидрогелем и обработанной инертной пылью.

Помимо лабораторных и стендовых экспериментов были проведены шахтные испытания рассматриваемого 4%-го гидрогеля с целью подтверждения и уточнения его адгезионных, влаго- и пылеулавливающих свойств, а также определения рациональной области применения.

Методика шахтных испытаний включала приготовление на поверхности угольной шахты 4%-го гидрогеля, его доставку в подземные горные выработки и проведение обработки небольших участков

(размером примерно 2×3 м) на боках выработок. Для проведения экспериментов выбирались различные типы горных выработок, отличающиеся интенсивностью пылеотложения, расположением источников пылевыделения и микроклиматическими параметрами. В местах проведения опытов выполнялись замеры температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, атмосферного давления и запыленности.

Для определения микроклиматических параметров и атмосферного давления использовали приборы «ТГО-2МП» и «АПР-2М».

Концентрация пыли определялась с помощью прибора «ПКА-01», также анализировались данные, снятые с мультиизмерительных комплексов «МИК-01», входящих в многофункциональную систему безопасности (МФСБ).

После нанесения слоя гидрогеля в последующие дни осуществлялось наблюдение за состоянием его поверхности, а также систематически отбирались пробы для контроля влажности смеси «угольная пыль+гидрогель» и определения массы осевшей углепородной пыли.

## Результаты и обсуждения

По итогам стендовых испытаний были получены данные о распределении угольной пыли по поверхностям физической модели выработки при разных значениях скоростей движения воздушного потока и интенсивности пылеотложения (см. рис. 2, 3).

Исходя из приведенных результатов, следует несколько выводов:

- при очень малой концентрации пылевых частиц в воздухе, соответствующей минимальной величине интенсивности пылеотложения ( $P_t = 0,1$  г/м<sup>3</sup>·сут) и минимальной скорости движения воздуха, равной 0,5 м/с, частицы практически сразу после выхода из загрузочного отверстия во внутреннее пространство

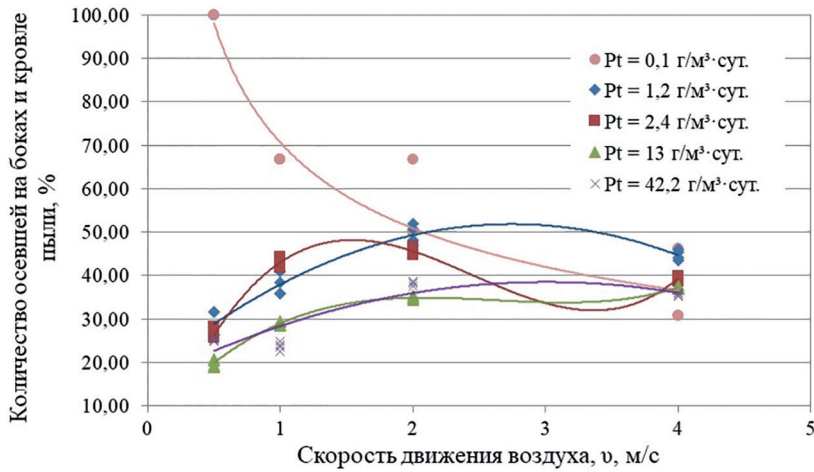


Рис. 2. Зависимость количества пыли, осевшей на боках и кровле модели выработки, от скорости движения воздуха при различных значениях интенсивности пылеотложения [составлен авторами]

Fig. 2. Relationship of the amount of dust on the walls and roof of the mine model on the air speed of air movement at different values of dust deposition intensity [compiled by the authors]

стенда попадают на боковые поверхности модели, не достигнув почвы; по мере увеличения скорости воздушного потока (до 1 – 4 м/с) и массы пыли, подаваемой в стенд с учетом сохранения постоянства величины  $P_d$ , отмечается рост массы осевшей на почве пыли при пропорциональном снижении ее количества на боках и кровле;

- при интенсивностях пылеотложения от 0,1 до 42,2 г/м³·сут наблюдается единый характер распределения пылевых частиц — при увеличении скорости воздуха от 0,5 до 2 м/с доля частиц, закрепившихся на боках и кровле, постепенно увеличивается, при скоростях более 2 – 3 м/с доля осевшей на почве пыли резко возрастает, что свидетельствует о

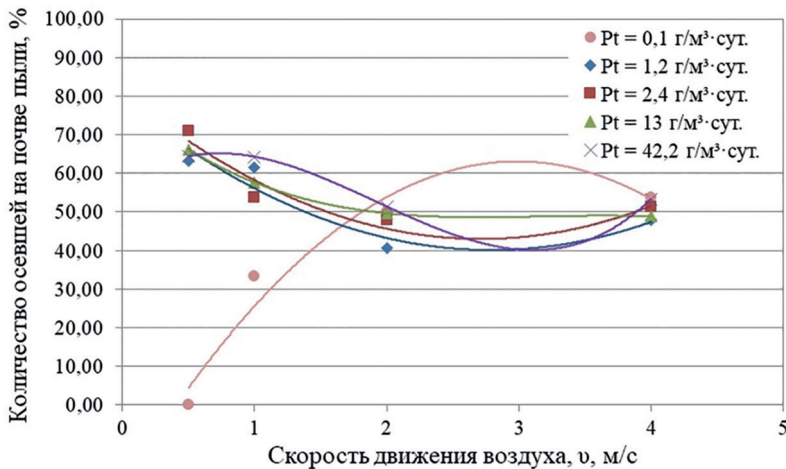


Рис. 3. Зависимость количества пыли, осевшей на почве модели выработки, от скорости движения воздуха при различных значениях интенсивности пылеотложения [составлен авторами]

Fig. 3. Relationship of the amount of dust on the sill of the model mine on the air speed of air movement at different values of dust deposition intensity [compiled by the authors]



срыве части ранее закрепившейся на боках и кровле пыли.

Исследование пылевой динамики по длине модели показало высокую степень корреляции полученных авторами результатов с теоретическими и экспериментальными данными других ученых [13, 14]. Масса пыли, выпадающей из запыленного воздуха в первой трети части стенда, и в частности на первой подложке ( $r = 0,9$  м), при различных варьируемых параметрах (изменении скорости воздушной струи и количества подаваемой пыли) было стабильно больше по сравнению с массой пыли, оседающей на последующих участках ( $r = 1,4$  и  $r = 2$  м).

Для оценки эффективности пылезакрепляющих свойств гидрогеля были проведены серии экспериментов по ранее описанной методике при максимальной скорости воздушного потока 4 м/с и наиболее высоких значениях интенсивности пылеотложения — 2,4; 13 и 42,2 г/м<sup>3</sup>·сут.

По окончании опытов определялась масса пыли, которая оседала по всей площади почвы модели, включая пылеотложение на подложках, и которая попадала в пылесборник, расположенный за пределами основной части стенда, а также на фильтры. Из уравнения баланса рассчитывалась масса пыли, осевшей на боках и кровле выработки:

$$M_{\text{нав}} = M_{\text{подл}} + M_{\text{почв}} + M_{\text{фил}} + M_{\text{пылесбор}} + M_{\text{бок.кр}}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{нав}}$  — масса исходной навески угольной пыли, взятой для проведения эксперимента и подаваемой в стенд, мг;  $M_{\text{подл}}$  — суммарная масса пыли, осевшей на разложенных подложках, мг;  $M_{\text{почв}}$  — масса пыли, собранной с почвы модели, за исключением пыли, осевшей на подложках;  $M_{\text{фил}}$  — масса пыли, осевшей на фильтрах для измерения концентрации пыли, мг;  $M_{\text{пылесбор}}$  — масса пыли, осевшей в пылесборнике, мг;  $M_{\text{бок.кр}}$  — масса пыли, закрепившейся на

Таблица 1

**Результаты оценки пылезакрепляющих свойств гидрогеля [составлена авторами]  
Results of the research of the hydrogel's dust-fixing properties [compiled by the authors]**

№ эксперимента	Интенсивность пылеотложения, $P_i$ (г/м <sup>3</sup> )·сут	Масса пыли, осевшей на почве модели, мг		Масса пыли, осевшей на боках и кровле модели, мг	
		до обработки гидрогелем	после обработки гидрогелем	до обработки гидрогелем	после обработки гидрогелем
1	2,4	81,5	30,5	61,5	128,0
2	2,4	78,0	32,5	63,0	125,5
3	2,4	81,0	29,0	62,0	129,0
4	2,4	78,0	31,5	63,5	126,5
5	13,0	430,5	182,5	322,5	674,0
6	13,0	426,0	177,0	326,5	680,0
7	13,0	435,5	180,0	320,0	676,5
8	13,0	429,5	179,5	321,5	677,5
9	42,2	1498,0	853,0	999,0	1798,5
10	42,2	1511,0	865,0	1011,0	1777,0
11	42,2	1502,0	862,5	1016,5	1795,0
12	42,2	1515,0	874,0	989,0	1766,5

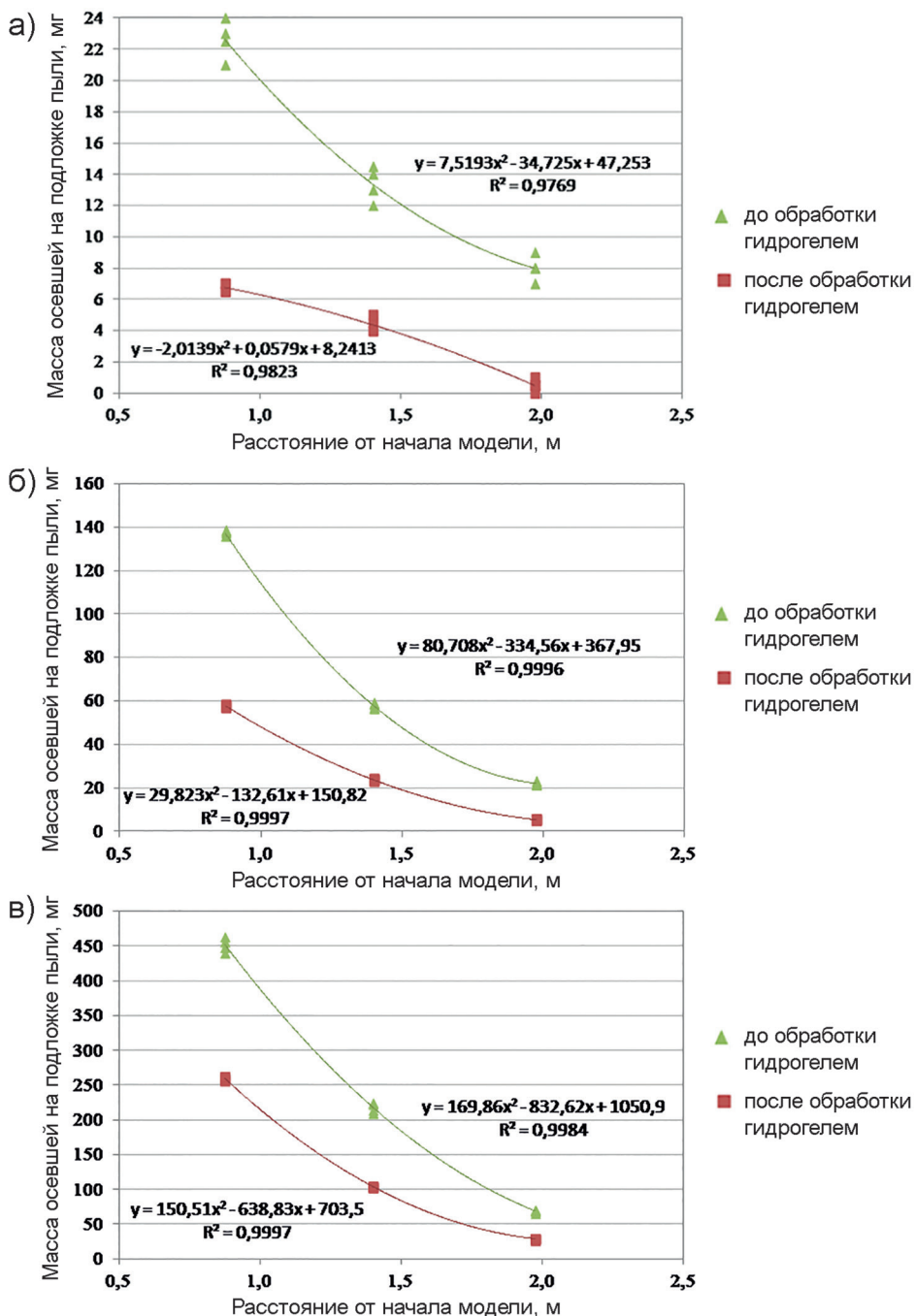


Рис. 4. Зависимость массы пыли, осевшей на почве модели выработки, от расстояния и обработанности стнда гидрогелем [составлен авторами]: при  $P_t = 2,4 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$  (а); при  $P_t = 13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$  (б); при  $P_t = 42,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$  (в)

Fig. 4. Relationship of the mass of dust on the sill of the model mine on the distance and treatment of the stand with hydrogel [compiled by the authors]: at  $P_t = 2.4 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$  (a); at  $P_t = 13.0 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$  (b); at  $P_t = 42.2 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$  (v)

боковых поверхностях и кровле модели, мг.

На рис. 4 и в табл. 1 приведены результаты экспериментов, отражающих положительную динамику в снижении количества пыли, оседающей на почве и отдельно взятых подложках, расположенных по длине стенда, при обработке поверхностей модели гидрогелем.

На основании сравнения средних значений массы пыли, осевшей на внутренних поверхностях стенда до его обработки гидрогелем и после, следует, что масса пыли, выпадающей из воздуха на почву, при обработке внутренних стенок стенда (за исключением почвы) 4%-м гидрогелем сократилась на 42,7–61,2%, а масса пыли, которая закрепилась на боковых поверхностях и кровле модели, увеличилась на 43,7–52,3%, или в 1,8–2,1 раза. Приведенные данные свидетельствуют о достаточно высокой эффективности предлагаемого к использованию гидрогеля в отношении пылезакрепления.

Концентрация пыли в стенде, измеренная практически сразу после обработки его внутренних поверхностей гидрогелем, заметно снизилась — на 79,1–83,3%, при подаче в стенд относительно небольшого количества пыли, определяемого величиной  $P_t = 2,4 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$  (см. табл. 2).

Увеличение интенсивности пылеподступления до значений, характерных для наиболее «пыленагруженных» участков в шахтах (выработок с исходящей воздушной струей, непосредственно прилегающих к очистным забоям, проходческих забоев, мест перегрузки углей на ленточных конвейерах), приводит к более ускоренному забиванию слоя гидрогеля пылью и снижению пылеулавливающего эффекта. Тем не менее, при экстремальных пылевых нагрузках, характеризующихся величинами  $P_t = 13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$  и  $P_t = 42,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ , эффективность снижения запыленности при использовании гидрогеля в первоначальный момент времени составила 46,6–50,9% и 39,7–47,6% соответственно.

Для оценки пылеулавливающих и пылезакрепляющих свойств гидрогеля с учетом его постепенного высыхания в естественных условиях и забивания угольной пылью была проведена еще одна серия опытов. На внутренние поверхности стенда наносился слой гидрогеля, и после его подсыхания в течение 4 ч осуществляли по ранее описанной методике подачу в стенд угольной пыли и проводили соответствующие измерения. При этом каждый последующий эксперимент проводился без зачистки гидрогеля, частично «напитавшегося» угольной пылью. Данный

Таблица 2

**Результаты измерения запыленности в физической модели до и после обработки ее гидрогелем [составлена авторами]**

**Results of dust measurement in a physical model before and after its treating with hydrogel [compiled by the authors]**

№ эксперимента	Интенсивность пылеотложения, $P_t$ (г/м <sup>3</sup> )·сут	Среднее значение запыленности в 1-м сечении, $C_1$ , мг/м <sup>3</sup>		Среднее значение запыленности во 2-м сечении, $C_2$ , мг/м <sup>3</sup>	
		до обработки гидрогелем	после обработки гидрогелем	до обработки гидрогелем	после обработки гидрогелем
1	2,4	375,0	62,5	14,8	3,1
2	13	890,6	437,5	35,2	18,8
3	42,2	2125,0	1281,3	67,2	35,2

Таблица 3

**Результаты измерения запыленности в стенде по истечении 4 ч после обработки его гидрогелем и при повторных пылевых нагрузках [составлена авторами]**  
**Results of measuring dustiness in the model after 4 hours of its treatment with hydrogel and repeated dust loads [compiled by the authors]**

№	Интенсивность пылеотложения, $P_t$ , (г/м <sup>3</sup> )·сут	Среднее значение запыленности		Эффективность снижения запыленности, %
		в 1-м сечении, $C_1$ , мг/м <sup>3</sup>	во 2-м сечении, $C_2$ , мг/м <sup>3</sup>	
1	2,4	62,5	3,1	79,1 – 83,3
2	13	500,0	21,9	37,8 – 43,9
3	42,2	1 671,9	48,5	21,3 – 27,8

методический подход был обусловлен стремлением получить наиболее объективные данные о пылеудерживающих свойствах гидрогеля, на который в условиях реальных горных выработок будет оказываться постоянное аэро- и пылединамическое воздействие. Исходя из анализа результатов, приведенных в табл. 3, следует отметить, что при  $P_t = 2,4$  г/м<sup>3</sup>·сут даже по истечении 4 ч с момента первоначальной обработки стенда и при повторных пылевых нагрузках сохраняется высокий пылеулавливающий и пылезакрепляющий эффект.

При  $P_t = 13,0$  г/м<sup>3</sup>·сут эффективность снижения запыленности несколько уменьшилась по сравнению с первоначальными значениями и составила 37,8 – 43,9%. При  $P_t = 42,2$  г/м<sup>3</sup>·сут пылеулавливающий эффект самый минимальный — концентрация пыли после обработки стенда гидрогелем, который подсыхал в течение 4 ч в естественных условиях, ниже по сравнению с запыленностью в необработанном стенде на 21,3 – 27,8%.

Исходя из понимания того, что в шахтных условиях преимущественно постоянные пылединамические нагрузки, а не циклические, как при проведении стендовых испытаний, авторами был сделан вывод о нецелесообразности применения гидрогеля для обработки горных выработок с чрезвычайно высокой интен-

сивностью пылеотложения, превышающей 13 г/м<sup>3</sup>·сут.

Последующие шахтные эксперименты, проведенные на 4 опытных участках, подтвердили предположения и выводы, сделанные по результатам лабораторных и стендовых исследований.

За все время проведения шахтных экспериментов, составившее более одной недели, слой гидрогеля толщиной от 4 – 6 до местами 10 – 12 мм не только держался на различных вертикальных поверхностях (бетонной, угольного массива), но и удерживал оседающую на нем угольную пыль. В условиях различных пылевых нагрузок (при  $P_t = 1,29; 2,29; 2,46; 13,44$  г/м<sup>3</sup>·сут) не наблюдалось формирования на поверхности гидрогеля «корочки» или слоя из «сухой пыли». Напротив, слой гидрогеля постепенно абсорбировал пылевидные частицы внутрь с поверхности, обеспечивая должный уровень пылевзрывозащиты.

Влажность смеси за одну неделю снизилась не более чем на 19%, с 96 до 77,1 – 78,5%, исходя из чего можно предположить, что при средней интенсивности пылеотложения, равной  $P_t = 2,4$  г/м<sup>3</sup>·сут, и микроклиматических параметрах, характерных для данного типа горных выработок ( $t = 14,3 – 15,8$  °С;  $\varphi_B = 67,5 – 77,0\%$ ;  $S_B = 2,5 – 3,1$  м/с;  $p_{вТМ} = 101,3 – 101,6$  кПа), «пылевзрывозащитный эффект» сохранится на про-

тяжении 3–5 недель, что в 2–3,5 раза дольше по сравнению с продолжительностью эффекта от осланцевания, составляющего 10–11 сут.

Для выработок с высокой интенсивностью пылеотложения  $P_t = 13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$  продолжительность действия гидрогеля будет определяться в основном не его влажностью, а степенью забивания угольной пылью. Как показали исследования в путевом штреке на исходящей из очистного забоя струе, влажность гидрогеля через 4 сут после его нанесения была выше 90%, но уровень насыщения угольной пылью при этом приближался к максимальному. В данном случае срок «эффективного действия» гидрогеля составляет 4–6 сут, что все равно больше чем в 2 раза по сравнению с осланцеванием. Следует отметить, что периодичность осланцевания для такого рода выработок может составлять от 1 раза в 1–2 сут до нескольких раз в сутки в зависимости от пределов взрывчатости угольной пыли, в то время как на периодичность обработки горных выработок гидрогелем это не влияет.

Что касается горных выработок с более высокой интенсивностью пылеотложения и пылеотложения — более  $13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ , то их обработка гидрогелем вместо осланцевания будет неэффективной вследствие быстрого «забивания» пылью. В общешахтных выработках с малой интенсивностью пылеотложения (менее  $1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ ) и высокими скоростями воздушного потока (4,5–7 м/с) применение гидрогеля также нецелесообразно по причине необходимости повторного нанесения гидрогеля или его увлажнения с периодичностью выше частоты нанесения инертной пыли.

### **Заключение**

Основными причинами аварийности, травматизма и профзаболеваемости по пылевому фактору на угольных шахтах

являются недостаточно эффективные и надежные мероприятия комплексного обеспыливания и пылевзрывозащиты, высокая трудо- и энергоемкость их реализации, приводящая к нарушению регламента проведения работ, человеческий фактор. Осланцевание, являющееся основным мероприятием по обеспечению пылевзрывобезопасности в горных выработках, несмотря на все его преимущества (экологичность, доступность сырья, отлаженность технологии и т.п.), негативно сказывается на пылевой обстановке в горных выработках, повышает загрузку внутришахтного транспорта, увеличивает тяжесть труда и в целом снижает эффективность угледобычи.

Техническим решением, которое позволит отказаться от осланцевания части горных выработок, по мнению авторов, может стать обработка горных выработок растворами суперабсорбента (гидрогелем).

Результаты лабораторных исследований химического состава и физических свойств (текучести, влажности, вязкости, адгезии) гидрогеля на основе полипроп-2-еноата натрия, хлорида аммония и хлорида натрия показали возможность применения его 4%-го водного раствора в качестве средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности.

В ходе лабораторных (стендовых) исследований пылевой динамики на физической модели горной выработки доказана эффективность пылезакрепления и снижения запыленности при использовании гидрогеля, определена критическая скорость срыва пылевых частиц и получено распределение угольной пыли по поверхностям модели, что необходимо учитывать при определении расхода материала и периодичности мероприятий пылевзрывозащиты, то есть расхода гидрогеля и периодичности его нанесения.

По итогам проведенных шахтных испытаний можно рекомендовать приме-

нение гидрогеля вместо осланцевания для подземных горных выработок, оснащенных ленточными конвейерами, и выработок, прилегающих к очистному забою, при учете микроклиматических условий и интенсивности пылеотложения, которая лежит в пределах от 1,2 до

13 г/м<sup>3</sup>·сут. Исходя из того, что общий объем указанных типов выработок составляет более 50% от общего числа выработок, реализация предложенного технического решения представляется целесообразной и позволит значительно повысить безопасность труда.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мешков Г. Б., Петренко И. Е., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. — 2024. — № 3. — С. 18–29. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.
2. Мохначук И. И., Пиктушанская Т. Е., Брылева М. С., Бетц К. В. Смертность на рабочем месте на предприятиях угольной промышленности России // Медицина труда и промышленная экология. — 2023. — № 63(2). — С. 88–93. DOI: 10.31089/1026-9428-2023-63-2-88-93.
3. Фомин А. И., Анисимов И. М., Анопочкин И. О., Артинова С. Г., Аносова Ю. В. Состояние условий труда и профессиональной заболеваемости в Кемеровской области — Кузбассе / Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах. Сборник материалов XIV международной научно-практической конференции. — Кемерово, 2021. — С. 227-1–227-13.
4. 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.
5. 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.
6. Гендлер С. Г., Степанцова А. Ю., Попов М. М. Обоснование безопасной эксплуатации закрытых угольных складов по газовому фактору // Записки Горного института. — 2024. — С. 1–11.
7. Баловцев С. В. Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах // Горные науки и технологии. — 2023. — Т. 8. — № 4. — С. 350–359. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163.
8. Sidorenko S., Trushnikov V., Sidorenko A. Methane emission estimation tools as a basis for sustainable underground mining of gas-bearing coal seams // Sustainability. 2024, vol. 16, article 3457. DOI: 10.3390/su16083457.
9. 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.
10. Гендлер С. Г., Василенко Т. А., Степанцова А. Ю. Экспериментальные исследования параметров массопереноса в каменных углях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9-1. — С. 135–148. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_135.
11. Vasilenko T. A., Islamov A., Doroshkevich A. S., Łudzik K., Chudoba D., Kirillov A., Mita C. Permeability of a coal seam with respect to fractal features of pore space of fossil coals // Fuel. 2022, vol. 329, article 125113. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125113.
12. Saarikoski S., Teinilä K., Timonen H., Aurela M., Laaksovirta T., Reyes F., Vasques Y., Oyola P., Artaxo P., Pennanen S., Junntila S., Linnainmaa M., Salonen R. O., Hillamo R. Particulate matter characteristics, dynamics and sources in an underground mine // Aerosol Science and Technology. 2018, vol. 52, no. 1, pp. 114–122. DOI: 10.1080/02786826.2017.1384788.
13. 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.
14. Романченко С. Б., Руденко Ю. Ф., Костеренко В. Н. Пылевая динамика в угольных шахтах. — М.: Изд-во «Горное дело», ООО «Киммерийский центр», 2011. — 256 с.

15. Габов В. В., Гаращенко Ж. М. Обоснование структуры механизированного комплекса для отработки целиков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 11-1. — С. 38 — 50. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_11\_0\_38.
16. Хохлов С. В., Виноградов Ю. И., Маккоев В. А., Абиев З. А. Влияние скорости детонации взрывчатых веществ на степень предразрушения горной породы при взрыве // Горные науки и технологии. — 2024. — № 9(2). — С. 85 — 96. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-11-177.
17. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Зигангиров Р. Р., Мифтахов А. А., Суворов Ю. И. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 231 — 245.
18. 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.
19. Xia T., Xi Z., Suo L., Wang C. Synergistic dopa-reinforced fluid hydrosol as highly efficient coal dust suppressant // Chemical Engineering Journal. 2024, vol. 479, article 147641. DOI: 10.1016/j.cej.2023.147641.
20. Ren B., Yuan L., Zhou G., Li Sh., Meng Q., Wang K., Jiang B., Yu G. Effectiveness of coal mine dust control. A new technique for preparation and efficacy of self-adaptive microcapsule suppressant // International Journal of Mining Science and Technology. 2022, vol. 32, no. 6, pp. 1181 — 1196. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.006.
21. Ji M., Sun Z., Guo H. The application of the foam technology to the dust control for reducing the dust injury of coal mines // Applied Sciences. 2022, vol. 12, article 10878. DOI: 10.3390/app122110878.
22. Wang H., Cheng S., Wang H., He J., Fan L., Danilov A. S. Synthesis and properties of coal dust suppressant based on microalgae oil extraction // Fuel. 2023, vol. 338, article 127273. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127273.
23. Liu R., Zhou G., Wang K., Niu Ch., Zhang Q., Wang Y., Dong Xi., Ramakrishna S. Experimental investigation on highly efficient collection and cleaning for fine coal dust particles by dry-wet mixed chemical method // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021, vol. 9, no. 5, article 105861. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105861.
24. Пернебек Б. П., Семенов Ю. В., Рыбичев А. А., Козлова Л. О. Оценка эффективности смачиваемости угольной пыли при разных температурах растворов // Уголь. — 2024. — № 1. — С. 70 — 75. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-70-75.
25. Zhou Q., Qin B. Coal dust suppression based on water mediums. A review of technologies and influencing factors // Fuel. 2021, vol. 302, article 121196. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121196.
26. Liu G., Hou M. Advanced technologies on mine dust prevention and control // Applied Sciences. 2023, vol. 13, article 4869. DOI: 10.3390/app13084869.
27. Martirosyan A. V., Ilyushin Yu. V. The development of the toxic and flammable gases concentration monitoring system for coalmines // Energies. 2022, vol. 15, pp. 8917 — 8917. DOI: 10.3390/en15238917.
28. 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.
29. 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.
30. Patra S. K., Poddar R., Brestic M., Acharjee P. U., Bhattacharya P., Sengupta S., Pal P., Bam N., Biswas B., Berek V., Ondrisik P., Skalicky M., Hossain A. Prospects of hydrogels in agriculture for enhancing water productivity under water deficit condition // Hindawi International Journal of Polymer Science. 2022, vol. 2022, article 4914836. DOI: 10.1155/2022/4914836.
31. Галкин С. В., Рожкова Ю. А. Анализ опыта применения предварительно сшитых полимерных гелей при разработке высокообводненных эксплуатационных объектов в условиях низкотемпературных нефтяных пластов // Записки Горного института. — 2024. — Т. 265. — С. 55 — 64.
32. Карапетян К. Г., Дорosh И. В., Згонник П. В., Коршунов А. Д., Перина А. И. Сорбенты на основе вспененного фосфатного стекла для сбора нефтепродуктов с загрязненных почв и водных поверхностей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2024. — Т. 335. — № 8. — С. 227 — 240. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4484.

33. 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.

34. 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.9b03551.

35. Liu Ya., Wei Zh., He M., Zhao W., Wang J., Zhao Ju. Preparation of dopamine-modified sea squirt cellulose hydrogel dust-fixing agent to prevent raising of dust // *Environmental Research*. 2023, vol. 237, part 1, article 116803. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116803.

36. Корнев А. В., Спицын А. А., Займенцева Л. А., Зубко М. В. Исследование физико-химических свойств гидрогеля как средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности в угольных шахтах // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 9-1. – С. 180–198. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_180. **ИИAB**

## REFERENCES

1. Meshkov G. B., Petrenko I. E., Gubanov D. A. Russia's coal industry performance for 2023. *Ugol'*. 2024, no. 3, pp. 18–29. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.

2. Mokhnachuk I. I., Piktushanskaya T. E., Bryleva M. S., Betts K. V. Workplace mortality at coal industry enterprises of Russia. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2023, no. 63(2), pp. 88–93. [In Russ]. DOI: 10.31089/1026-9428-2023-63-2-88-93.

3. Fomin A. I., Anisimov I. M., Anopochkin I. O., Artinova S. G., Anosova Yu. V. The state of working conditions and occupational morbidity in the Kemerovo region – Kuzbass. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti predpriyatiy v promyshlenno razvitykh regionakh. Sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Life safety of enterprises in industrialized regions. Collection of Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference], Kemerovo, 2021, pp. 227-1–227-13. [In Russ].

4. Fomin A. I. Analysis of conditions and labor protection at enterprises of Kuzbass coal industry. *Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2020, no. 3, pp. 57–61. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.53.88.007.

5. 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.

6. Gendler S. G., Stepanstova A. Y., Popov M. M. Justification on the safe exploitation of closed coal warehouse by gas factor. *Journal of Mining Institute*. 2024, pp. 1–11. [In Russ].

7. Balovtsev S. V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 4, pp. 350–359. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163.

8. Sidorenko S., Trushnikov V., Sidorenko A. Methane emission estimation tools as a basis for sustainable underground mining of gas-bearing coal seams. *Sustainability*. 2024, vol. 16, article 3457. DOI: 10.3390/su16083457.

9. 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.

10. Gendler S. G., Vasilenko T. A., Stepanstova A. Yu. Investigation of mass transfer of hard coal during its transportation to the place of temporary storage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9-1, pp. 135–148. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_135.

11. Vasilenko T. A., Islamov A., Doroshkevich A. S., Łudzik K., Chudoba D., Kirillov A., Mita C. Permeability of a coal seam with respect to fractal features of pore space of fossil coals. *Fuel*. 2022, vol. 329, article 125113. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125113.

12. Saarikoski S., Teinilä K., Timonen H., Aurela M., Laaksovirta T., Reyes F., Vasques Y., Oyola P., Artaxo P., Pennanen S., Juntila S., Linnainmaa M., Salonen R. O., Hillamo R. Particulate matter characteristics, dynamics and sources in an underground mine. *Aerosol Science and Technology*. 2018, vol. 52, no. 1, pp. 114–122. DOI: 10.1080/02786826.2017.1384788.

13. 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.
14. Romanchenko S. B., Rudenko Yu. F., Kosterenko V. N. *Pylevaya dinamika v ugol'nykh shakhtakh* [Dust dynamics in coal mines], Moscow, 2011, 256 p.
  15. Gabov V. V., Garashchenko Zh. M. Defining the structure of a mechanised complex for extracting coal pillars. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 11-1, pp. 38–50. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_11\_0\_38.
  16. Khokhlov S. V., Vinogradov Yu. I., Makkoev V. A., Abiyev Z. A. Effect of explosive detonation velocity on the degree of rock pre-fracturing during blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, no. 9(2), pp. 85–96. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-11-177.
  17. Vinogradov Y. I., Khokhlov S. V., Zigangirov R. R., Miftakhov A. A., Suvorov Y. I. Optimization of specific energy consumption for rock crushing by explosion at deposits with complex geological structure. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 266, pp. 231–245. [In Russ].
  18. 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.
  19. Xia T., Xi Z., Suo L., Wang C. Synergistic dopa-reinforced fluid hydrosol as highly efficient coal dust suppressant. *Chemical Engineering Journal*. 2024, vol. 479, article 147641. DOI: 10.1016/j.cej.2023.147641.
  20. Ren B., Yuan L., Zhou G., Li Sh., Meng Q., Wang K., Jiang B., Yu G. Effectiveness of coal mine dust control. A new technique for preparation and efficacy of self-adaptive microcapsule suppressant. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022, vol. 32, no. 6, pp. 1181–1196. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.006.
  21. Ji M., Sun Z., Guo H. The application of the foam technology to the dust control for reducing the dust injury of coal mines. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, article 10878. DOI: 10.3390/app122110878.
  22. Wang H., Cheng S., Wang H., He J., Fan L., Danilov A. S. Synthesis and properties of coal dust suppressant based on microalgae oil extraction. *Fuel*. 2023, vol. 338, article 127273. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127273.
  23. Liu R., Zhou G., Wang K., Niu Ch., Zhang Q., Wang Y., Dong Xi., Ramakrishna S. Experimental investigation on highly efficient collection and cleaning for fine coal dust particles by dry-wet mixed chemical method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021, vol. 9, no. 5, article 105861. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105861.
  24. Pernebek B. P., Semenov Yu. V., Rybichev A. A., Kozlova L. O. Assessment of the effectiveness of wettability of coal dust at different solution temperatures. *Ugol'*. 2024, no. 1, pp. 70–75. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-70-75.
  25. Zhou Q., Qin B. Coal dust suppression based on water mediums. A review of technologies and influencing factors. *Fuel*. 2021, vol. 302, article 121196. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121196.
  26. Liu G., Hou M. Advanced technologies on mine dust prevention and control. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, article 4869. DOI: 10.3390/app13084869.
  27. Martirosyan A. V., Ilyushin Yu. V. The development of the toxic and flammable gases concentration monitoring system for coalmines. *Energies*. 2022, vol. 15, pp. 8917–8917. DOI: 10.3390/en15238917.
  28. 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, 2022, pp. 230–235. [In Russ].
  29. 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.
  30. Patra S. K., Poddar R., Brestic M., Acharjee P. U., Bhattacharya P., Sengupta S., Pal P., Bam N., Biswas B., Berek V., Ondrisik P., Skalicky M., Hossain A. Prospects of hydrogels in agriculture for enhancing water productivity under water deficit condition. *Hindawi International Journal of Polymer Science*. 2022, vol. 2022, article 4914836. DOI: 10.1155/2022/4914836.

31. Galkin S. V., Rozhkova Y. A. Analysis of experience in the use of preformed particle polymer gels in the development of high-water-cut production facilities in low-temperature oil reservoirs. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 265, pp. 55–64. [In Russ].

32. Karapetyan K. G., Dorosh I. V., Zgonnik P. V., Korshunov A. D., Perina A. I. Sorbents based on foamed phosphate glass for collecting petroleum oil products from contaminated soils and water surfaces. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024, vol. 335, no. 8, pp. 227–240. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4484.

33. 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.

34. 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.9b03551.

35. Liu Ya., Wei Zh., He M., Zhao W., Wang J., Zhao Ju. Preparation of dopamine-modified sea squirt cellulose hydrogel dust-fixing agent to prevent raising of dust. *Environmental Research*. 2023, vol. 237, part 1, article 116803. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116803.

36. Kornev A. V., Spitsyn A. A., Zaimentseva L. A., Zubko M. V. Research of the physico-chemical properties of hydrogel as a means of dust-explosion protection and dust reduction in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9-1, pp. 180–198. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_180.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корнев Антон Владимирович<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: Kornev\_AV@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-6371-9969,

Спицын Андрей Александрович<sup>1</sup> — аспирант,  
e-mail: spitsyn1998@inbox.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-1148-6109,

Коршунов Геннадий Иванович<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
профессор, профессор,  
e-mail: Korshunov\_GI@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-2074-9695,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

**Для контактов:** Корнев А.В., e-mail: Kornev\_AV@pers.spmi.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Kornev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
e-mail: Kornev\_AV@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-6371-9969,

A.A. Spitsyn<sup>1</sup>, Graduate Student,  
e-mail: spitsyn1998@inbox.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-1148-6109,

G.I. Korshunov<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor, e-mail: Korshunov\_GI@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-2074-9695,

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,  
Saint-Petersburg, 199106, Russia.

**Corresponding author:** A.V. Kornev, e-mail: Kornev\_AV@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 02.01.2025; получена после рецензии 03.02.2025; принята к печати 10.03.2025.

Received by the editors 02.01.2025; received after the review 03.02.2025; accepted for printing 10.03.2025.