

ОЦЕНКА ПРОГНОЗНОЙ ЗАПЫЛЕННОСТИ В ЗАБОЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ СМАЧИВАЕМОСТИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

А. В. Корнев¹, Н. В. Ледяев², Е. И. Кабанов¹, М. В. Корнева¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия;

² АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, 652507, Россия

Аннотация: Фактическая пылевая обстановка в проходческих и добычных забоях угольных шахт остается сегодня наиболее неблагоприятной и во многом зависит от эффективности мероприятий обеспыливания, подбор которых осуществляется на основе величины прогнозной запыленности. Используемые для ее расчета формулы не учитывают время и специфику смачивания углеспородной пыли растворами шахтных смачивателей, а следовательно, не отражают в полной мере реальное состояние шахтной атмосферы по пылевому фактору. В работе показаны недостатки существующей методики оценки прогнозной запыленности в забоях угольных шахт; проанализированы показатели удельного пылевыделения угольных пластов, обрабатываемых на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс»; приведены результаты исследований смачиваемости угольной пыли различного состава и замеров запыленности в очистных забоях угольных шахт, проведенных авторами. На основе всей совокупности экспериментально полученных данных и проанализированных сопутствующих факторов, используя методы корреляционно-регрессионного анализа, было выведено уравнение множественной линейной регрессии для расчета прогнозной запыленности. Предлагаемая формула учитывает влияние на запыленность ряда горно-геологических и физических характеристик угольных пластов и горнотехнических параметров их обработки. Для расчета времени смачивания угольной пыли, определяющего в значительной степени особенности процесса ее витания и скорость седиментации, предложена формула, учитывающая вариативность физико-химических свойств пыли углей различного петрографического состава, тип применяемого смачивателя и концентрацию его рабочего раствора.

Ключевые слова: угольная шахта, очистной забой, взвешенная угольная пыль, прогнозная запыленность, пылеподавление, время смачивания пыли, производительность комбайна, крепость угля, мощность пласта, эффективность противопылевых мероприятий.

Для цитирования: 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.

Estimation of predictive dust content in the faces of coal mines taking into account the peculiarities of the wettability of coal dust

A. V. Kornev¹, N. V. Ledyayev², E. I. Kabanov¹, M. V. Korneva¹

¹ St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia;

² JSC «SUEK-Kuzbass», Leninsk-Kuznetsky, 652507, Russia

Abstract: The actual dust situation in shortwall and longwall faces of coal mines remains the most unfavorable and largely depends on the effectiveness of dust dedusting measures. The selection of dedusting measures is carried out on the basis of the predicted dust content. The formulas, which used for its calculation, do not take into account the time and specifics of the wetting of coal dust with solutions of mine wetting agents, and therefore do not reflect to the extent the real state of the mine atmosphere in terms of the dust factor. The paper shows the shortcomings of the existing methodology for assessing the predictive dust content in the faces of coal mines; the indicators of specific dust emission of coal seams mined at the mines of JSC «SUEK-Kuzbass» are analyzed; the results of studies of the wettability of coal dust of various compositions and measurements of dust content in the working faces of coal mines carried out by the authors are given. Based on the totality of experimentally obtained data and analyzed cumulative factors, using the methods of correlation-regression analysis, a multiple linear regression to calculate the predicted dust content was obtained. The proposed formula has an impact on the dust content of a number of mining-geological and physical characteristics of coal seams and mining parameters of their processing. To calculate the wetting time of coal dust, which determines in a wide range the features of its soaring and sedimentation rate, a formula is proposed. Formula takes into account the variability of the physicochemical properties of coal dust of dense petrographic composition, the type of wetting agent and the concentration of its working solution.

Key words: coal mine, longwall face, airborne coal dust, predicted dust content, dust suppression, dust wetting time, combine productivity, coal hardness, seam thickness, efficiency of dust control measures.

For citation: 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;(6–2):115–134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.

Введение

Угольные шахты, несмотря на их чрезвычайную высокую опасность (относятся к опасным производственным объектам (ОПО) 1-го класса), остаются крайне востребованными и продолжают функционировать, внося значительный вклад в развитие топливно-энергетического сектора экономики России. Ежегодно предприятиями подземной угледобычи в среднем выдается на поверхность свыше 100 млн т (в 2021 году – 113 млн т), что составляет до 25 % и более от всего его объема, добываемого в стране (в 2021 году добыто всего 438,4 млн т) [1].

С 2000 года и по настоящее время отмечается тренд закрытия всех нерентабельных и убыточных шахт. Количество очистных забоев за данный период заметно (в 3 раза и более)

сократилось. На сегодня функционируют 53 шахты с 52 действующими забоями. Ввиду необходимости реализации программы по развитию угольной отрасли до 2035 года, предполагающей наращивание объемов добычи угля, нагрузки на комплексные механизированные забои (КМЗ) выросли с 4 710 тонн в сутки (т/сут) в 2020 году до 5 297 т/сут в 2021 году. По сравнению с 2000 годом, в котором среднесуточная добыча из одного забоя составила 1 324 т, интенсивность ведения работ к настоящему времени выросла в 4 раза. [1, 2]. Современные шахты характеризуются высокой концентрацией работ, как правило, в одном очистном забое, по принципу «шахта-лава» при одновременном увеличении параметров выемочного столба (протяженности – до 2 600 м и более, длины

лавы — до 400 м) [3]. Производительность труда за последние 10 лет возросла почти вдвое — со 127,0 т/мес на одного работника в 2011 году до 228,7 т/мес в 2021 году [1, 2]. Увеличение производительности привело к повышению интенсивности пылевыведения и, как следствие, росту запыленности.

Концентрация пыли в атмосфере горных выработок угольных шахт относится к числу основных факторов, определяющих состояние условий труда на рабочих местах. Наиболее высокие показатели запыленности, многократно превышающие предельно допустимые по СанПиН концентрации, характерны для таких видов работ, как очистная выемка, проходка и крепление горных выработок [4–7]. В настоящее время фактическая запыленность при ведении подземных горных работ изменяется от 30–40 мг/м³ до 200–250 мг/м³ и может превышать технически достижимый уровень (ТДУ) в случае неисправности или недостаточной эффективности средств гидрообеспыливания. Машинисты горно-выемочных машин, машинисты крепи, горнорабочие очистного забоя, горнорабочие и электрослесари работают во вредных по пылевому фактору условиях труда 2-й, 3-й и даже 4-й степени и, как следствие, чаще других категорий работников страдают от профессиональных заболеваний органов дыхания [4–8]. При повышенном содержании в воздухе пылевых частиц респираторной фракции у работников развиваются наиболее тяжелые формы легочных заболеваний — силикозы, антракозы и антракосиликозы [4, 9–11]. Вредоносность витающей углеродной пыли увеличивается при работе техники с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Пылевые частицы, имеющие высокую удельную поверхность,

активно адсорбируют на себе опасные для человека компоненты выхлопных газов, дополнительно перемешиваются с канцерогенными твердыми частицами несгоревшего топлива (сажевыми частицами) [12, 13].

Кроме того, высокая интенсивность пылевыведения в процессе ведения горных работ при низкой эффективности реализуемых противопылевых мероприятий приводит к выносу значительных объемов пыли за пределы забоев и увеличению доли участков с большой интенсивностью пылеосаждения (до 13 г/см³·сут и более). Так как на большинстве российских шахт угольная пыль является взрывчатой (характеризуется выходом летучих веществ свыше 15 %), то увеличение ее количества на стенках горных выработок и поверхностях оборудования приводит к повышению периодически осланцевания и обмывки, росту расхода инертной пыли и требует более тщательного контроля состояния пылевзрывобезопасности [14, 15]. Статистика аварийности и показателей травматизма на угольных шахтах, обусловленная взрывами пыли и газа, а также вследствие недостаточной видимости в условиях повышенной запыленности, не является утешительной [9, 14, 16, 17].

Вопросы снижения рисков аварий и профессиональных рисков, связанных с газовым и пылевым факторами, являются первоочередными в современных условиях высокой интенсивности ведения подземных горных работ [14, 18–22]. В настоящее время проводится достаточно большое количество исследований по изучению аэродинамических и пылединамических процессов, протекающих как в подземных, так и в открытых горных выработках [23–26]. Одним из основных инструментов для проведения данных

исследований является современное программное обеспечение, позволяющее моделировать различные условия отработки месторождений и влияние разных факторов на пыле- и аэрогазовую среду, при постоянно меняющихся их параметрах [27 — 30].

С наращиванием объемов угледобычи вопрос снижения запыленности становится более острым и нуждается в решении.

Все применяемые на шахтах противопылевые мероприятия можно условно разделить на 3 группы: 1) направленные преимущественно на снижение количества образующейся и взвешенной в воздухе пыли (предварительное увлажнение, вентиляция, орошение, аспирация, своевременное обслуживание резцов комбайна, промывка шпуров, водяные, туманообразующие и лабиринтно-тканевые обеспыливающие завесы); 2) позволяющие снизить количество отложившейся на поверхностях горных выработок пыли и перевести ее в невзрывоопасное состояние (побелка, обмывка, осланцевание); 3) основной целью которых является ограничение распространения взрыва пыли, если как таковой его не удалось предотвратить (водяные и сланцевые заслоны, автоматические средства локализации) [8, 17, 23]. Для связывания пыли, осевшей на боках горных выработок, и предупреждения ее перехода во взвешенное состояние применяют растворы пылесмачивающих, пылесвязывающих и пылезакрепляющих составов, представленных смачивателями, гидрогелями, специальными пастами [31 — 34].

Одним из наиболее распространенных подходов к борьбе с пылью является предотвращение ее взметывания и подавление пыли в источнике образования при разрушении пласта за счет проведения предварительного увлаж-

нения массива (там, где это целесообразно и возможно) и использования орошения [8, 32]. Орошение предусматривается как на самом комбайне (через форсунки на корпусе, поворотных редукторах, на шнеке под резцами), так и на секциях механизированной крепи (через форсунки, расположенные под и над щитовым перекрытием крепи и направленные соответственно в сторону забоя и на завал).

Чтобы повысить эффективность пылеподавления при использовании средств орошения и снизить количество расходуемой воды, применяются растворы шахтных смачивателей [31, 32, 35], в некоторых случаях — пены [36, 37]. Наиболее эффективным из применяемых в российских шахтах в настоящее время смачивателей является смачиватель торговой марки «Эльфор-М». Типовая технологическая схема пылеподавления при ведении работ в лаве приведена на рис. 1.

На российских угольных шахтах в той или иной степени реализуются практически все рассмотренные выше противопылевые мероприятия. Однако, выбор средств обеспыливания и параметров их функционирования осуществляется на основе величины прогнозной запыленности, при расчете которой не учитывается влияние такого значимого фактора, как время смачивания угольной пыли. Стоит отметить, что чем быстрее смачивается пыль, тем быстрее она выпадает из воздуха и тем ниже запыленность. Скорость взаимодействия тонкодисперсных угольных частиц с капельками воды определяется не только соотношением их размеров, но и, прежде всего, величиной поверхностного натяжения, возникающего на границе раздела фаз «жидкая — твердая». Значение данного параметра зависит как от марки разрушаемого угля, так и от иных особенностей его петрогра-

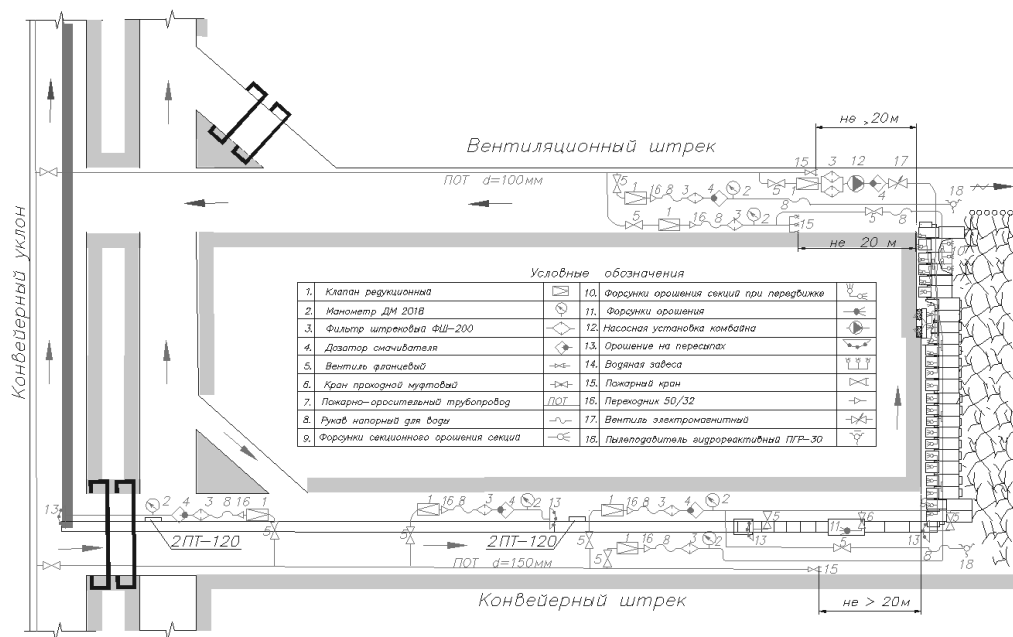


Рис. 1. Технологическая схема пылеподавления при ведении очистных работ [составлен авторами]

Fig. 1. Technological scheme of dust suppression during coal-face work [compiled by the authors]

фического состава, физических и химических свойств, добавки смачивающих веществ и их природы. Пренебрежение этими факторами приводит к неточности в оценке запыленности воздуха в забоях, прогнозируемой при отработке угольных пластов, и, как следствие, недостаточной эффективности выбранного комплекса мер обеспыливания и использованного для этих целей оборудования. На наш взгляд, в условиях повсеместного применения на шахтах различных типов смачивателей и значительной вариации качественных параметров добываемых углей стоит изменить методический подход к оценке величины прогнозной запыленности и обоснованию параметров средств комплексного обеспыливания.

Методы

Применялась совокупность аналитических, теоретических и экспериментальных методов исследования.

В частности, проведен детальный анализ расчетных формул и методик по определению пылеобразующей способности угольных пластов и прогнозной запыленности. Проанализированы величины удельного пылевыделения, прогнозной запыленности и эффективности противопылевых мероприятий для условий отработки угольных пластов на шахтах Кузбасса.

С целью всесторонней оценки пылевой обстановки в действующих очистных забоях и учета факторов, влияющих в наибольшей степени на ее формирование, проведены шахтные (натурные) замеры запыленности в 4 шахтах. Максимальная разовая концентрация (МРК) пыли измерялась по длине лавы — на рабочем месте машиниста крепи, рядом с комбайном (на рабочем месте машиниста) и на расстоянии 10 — 15 м от комбайна по ходу вентиляционной струи, а также в конвейерном штреке после

водяной завесы (на удалении 10–15 м от неё). В каждой точке проводилось не менее 3 замеров с помощью пылемера ПКА, применяемого на шахтах специалистами службы аэрологической безопасности для пылевого контроля, и не менее 3 замеров с помощью рудничного аспиратора АЭРА, используемого специалистами военизированных горноспасательных взводов в рамках ежеквартальной проверки противоаварийной устойчивости обслуживаемых предприятий.

Исследования времени смачивания пыли угольных пластов проводились лабораторным методом в соответствии с методикой, приведенной в стандарте «Методы определения смачивающей способности растворов поверхностно-активных веществ по отношению к пыли угольных шахт» от 2014 года. Проба угля, отобранного от соответствующего шахтопласта, уменьшалась сначала до 30 мм вручную, затем в несколько стадий — до крупности 5 мм на щековой и валковой дробилках. Полученный материал загружался в шаровую мельницу и измельчался в течение 10 минут. После измельчения с использованием ситового анализатора производился рассев пробы на ситах с размером ячейки 200 и 63 мкм. Из пробы тонкоизмельченного угля выделялось для одного опыта не менее 3 параллельных навесок крупностью –63 мкм массой $100 \pm 0,1$ мг каждая (рис. 2, а, б). Мерные стаканы заполнялись дистиллированной водой или растворами смачивателей заданной концентрации (в зависимости от цели опыта) до отметки 100 мл³ (рис. 2, в). Одним движением руки свежеприготовленные навески из бюксов высыпались в стаканы на поверхность воды или растворов смачивателей (рис. 2, г), и с помощью секундомера по пол-

ному погружению навесок в раствор измерялось время их смачивания (рис. 2, д, е). Время смачивания определялось с точностью до 0,01 секунды, и по результатам трех измерений рассчитывалось среднее арифметическое значение с округлением до целых. Концентрация растворов смачивателя «Эльфор-М», опытного смачивающего состава, отдельных поверхностно-активных веществ (ПАВ) и их комбинаций варьировалась в большинстве опытов от 0,02 % до 0,1 %. Оптимальным, согласно принятой методике, считается время смачивания навески, равное 60 секундам. Однако, на наш взгляд, следует стремиться к уменьшению данного показателя до минимально возможного значения. Чем быстрее произойдет увлажнение пылинок, тем быстрее они будут оседать на почву выработки, конвейера и иного оборудования, снижая общую концентрацию пыли в воздухе.

Для построения математической модели оценки запыленности в лавах с учетом влияния горнотехнических, горно-геологических факторов и физико-химических свойств обрабатываемых пластов применялся метод корреляционного-регрессионного анализа с проверкой полученной модели на адекватность.

Результаты

Современный подход к выбору противопылевых мероприятий и средств предполагает выполнение расчёта прогнозной запыленности в забое с учётом их эффективности. Выбранные противопылевые мероприятия, закладываемые в проект комплексного обеспыливания и пылевзрывозащиты, должны обеспечивать снижение прогнозной и фактической величин концентрации пыли до величины ТДУ, который не должен превышать 250 мг/м³ в воз-

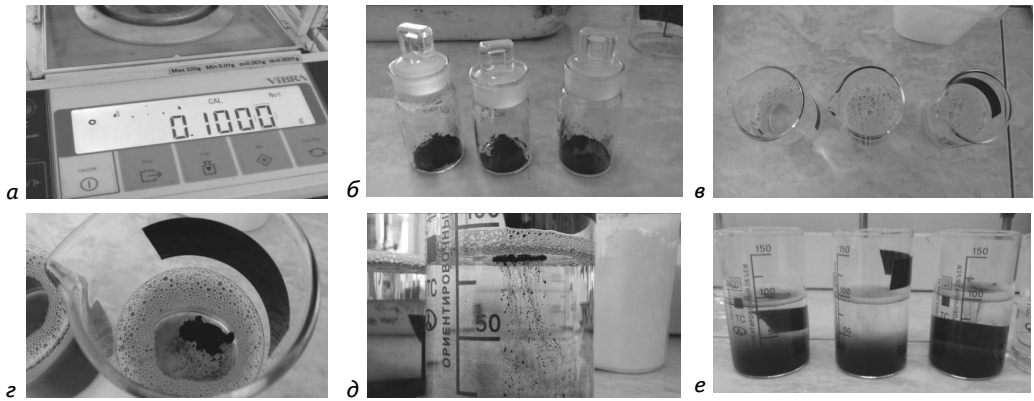


Рис. 2. Этапы проведения экспериментов по смачиваемости угольной пыли [35]: а – взвешивание навески угольной пыли; б – взвешенные бюксы с навесками угольной пыли; в – подготовка образцов раствора смачивателя; г – навеска угольной пыли, высыпанная в мерный стакан с раствором смачивателя; д – процесс смачивания навески; е – навески пыли, полностью смоченные раствором (осевшие с поверхности)

Fig. 2. Stages of carrying out experiments on the wettability of coal dust [35]: a – weighing of coal dust sample; b – weighted bottles with coal dust; c – preparation of wetting solution samples; d – a sample of coal dust poured into a beaker with a wetting solution; e – sample wetting process; f – dust samples completely wetted with solution (settled from surface)

духе очистных и подготовительных забоев и 150 мг/м^3 на выходе из них после обеспыливающей завесы.

Расчёт прогнозной запылённости в настоящее время проводится согласно Руководству по безопасности «Рекомендации по прогнозу и выбору мер, направленных на снижение запыленности рудничного воздуха в угольных шахтах», опубликованному в 2016 году. Величина прогнозной концентрации пыли в очистном забое ($C_{\text{оч. заб.}}$) рассчитывается по формуле

$$C_{\text{оч. заб.}} = 1000 \frac{2 \cdot q_{\text{пл}} \cdot P_{\text{оч}} (0,07 \cdot v_{\text{оч}}^3 + 1,1 \cdot v_{\text{оч}}^2 - 3,1 \cdot v_{\text{оч}} + 3,5)}{Q_{\text{оч}}} (1 - \mathcal{E}_{\text{оч}}), \text{ мг/м}^3, \quad (1)$$

где $q_{\text{пл}}$ – удельное пылевыведение, г/т; $P_{\text{оч}}$ – производительность добычного комбайна, т/мин; $v_{\text{оч}}$ – скорость воздуха в добычном забое, м/с; $Q_{\text{оч}}$ – расход воздуха в лаве, м³/мин.; $\mathcal{E}_{\text{оч}}$ – эффективность мероприятий по обеспыливанию атмосферы в лаве, доля.

Для выполнения расчёта, помимо того, что требуется знать предполагаемые значения скорости и расхода воздуха в забое и производительность комбайна, следует каждый раз для отдельно взятого пласта определять величину удельного пылевыведения ($q_{\text{пл}}$), вычисляемого как

$$q_{\text{пл}} = 150 \cdot a_{100} \cdot [(0,65 \cdot m_{\text{в}} + 0,07) \cdot 5,5 \cdot (\exp(-0,03 \cdot W))], \text{ г/т}, \quad (2)$$

где a_{100} – выход материала крупностью менее 100 мкм, определяемого путем отсева на ситовом анализаторе, %; W – влажность угля, %; $m_{\text{в}}$ – вынимаемая мощность пласта, м.

Определение данного показателя сопряжено с необходимостью отбора пластовых проб угля, их разделки и анализа, требующих дополнительных затрат времени, а также с погрешностью, связанной с методикой проведения самого анализа вследствие различия в характере разрушения угля в лабораторных и шахтных условиях.

Для расчета прогнозной запыленности, согласно рассматриваемой методике, необходимо знать эффективность закладываемых мер обеспыливания. Показатель эффективности мер по борьбе с пылью принимается в соответствии с приложением № 2 Руководства по безопасности. В частности, эффективность применения орошения с подачей воды в зону резания варьируется в диапазоне от 0,83 до 0,92. При этом для расчетов принимается минимальное значение эффективности. Из анализа сведений, приведенных в приложении, возникают вопросы:

1. Для каких условий и оборудования приведены параметры эффективности?

2. По какой причине при оценивании комплекса мер по борьбе с пылью выбирается наименьшее значение показателя эффективности и с чем связана его вариативность?

3. Зачем указывать в таблице максимальную эффективность, если нигде ее не используем в расчетах?

Кроме того, в представленных показателях не учитывается различие в скорости смачивания угольной пыли различного состава, при использовании, в том числе, различных шахтных смачивателей, смачивающая способность которых зависит от их типа и концентрации.

Для некоторых шахтопластов рассчитанные по формуле (1) значения прогнозной запыленности отличаются друг от друга в десятки раз (табл. 1).

Если величина прогнозной запыленности превышает ТДУ, то нужно про-

Таблица 1

Характеристики пылевыведения и прогнозной запыленности в лаве при отработке пластов [составлена авторами]

Characteristics of dust emission and predicted dust content in the longwall during seam mining [compiled by the authors]

Шахта / пласт	Марка угля	Удельное пылевыведение, г/т	Прогнозная запыленность, мг/м ³	Эффективность мероприятий по обеспыливанию, %
имени В. Д. Ялевского, пл.52	ДГ	639,4	6313,2–6781,8	93
имени В. Д. Ялевского, пл.50	ДГ	521,8	3638,6–3668,6	93
имени С. М. Кирова, пл. Болдыревский	ГЖ, Г	1039	3158,8	93
имени С. М. Кирова, пл. Поленовский	ГЖ, Г	1369,2	2882,2	93
Польсаевская, пл. Бреевский	Г	696,6	134,2	99
Комсомолец, пл. Бреевский	Г	1093	6281	93

изводить выбор дополнительных противопылевых мероприятий, которые позволят снизить концентрацию витающей пыли до этого уровня. Однако эффективность первоначально заложенных мер составляет и так 93–99 %, и вопрос принятия дальнейших мер остается открытым.

Всё это ставит под сомнение обоснованность используемых для расчёта прогнозной запылённости показателей эффективности противопылевых мероприятий применительно к современным условиям ведения подземных горных работ и свидетельствует о необходимости совершенствования существующей расчетной методики.

В связи с этим в лабораториях Санкт-Петербургского горного университета проведены исследования смачиваемости пыли углей различных шахтопластов, отличающихся физико-механическими свойствами, петрогра-

фическим, химическим и марочным составом (табл. 2).

В результате лабораторных исследований выявлено, что пыль углей одной и той же марки смачивается с разной скоростью, что в настоящее время никак не учитывается при подборе концентрации рабочего раствора шахтного смачивателя. На рис. 3 приведены кривые смачиваемости навесок угольной пыли 7 шахтопластов. Смачивание навесок проводилось растворами пылесмачивающего состава «Эльфор-М». Концентрация растворов варьировалась от 0,02 % до 0,1 %.

Во всех случаях без исключения отмечается тенденция снижения времени смачивания навесок при их взаимодействии с более концентрированными растворами. Наиболее интенсивное снижение времени смачивания зафиксировано при концентрациях 0,02–0,05 %. Это объясняется

Таблица 2

Характеристики углей, отобранных для проведения экспериментов [35]
Characteristics of coals, selected for experiments [35]

Шахта / пласт	Марка угля	Влажность W_t , %	Зольность, A_d , %	Содержание SiO_2 , β_{SiO_2} , %	Содержание Al_2O_3 , $\beta_{Al_2O_3}$, %	Содержание витринита, V_{tr} , %	Содержание инертинита, I , %
«Польсаевская», пл. Бреевский	Г	7,3	23,5	61,3	18,3	65	3
«Имени С. М. Кирова», пл. Болдыревский	Г	3,1	43,1	66,3	21,2	79	16
«Комсомолец», пл. Бреевский	Г	8,3	28,4	42,6	16,8	86	8
«Имени А. Д. Рубана», пл. Надбайкаимский	Д	12,5	25,2	62,0	18,0	89	9
Талдинская-Западная-2, пл. 70	Д	12,4	12,0	60,9	23,4	83	15
«Имени В. Д. Ялевского», пл. 50	ДГ	9,6	23,5	59,6	18,5	88	9
«Имени В. Д. Ялевского», пл. 52	ДГ	8,2	14,8	59,3	22,8	80	9

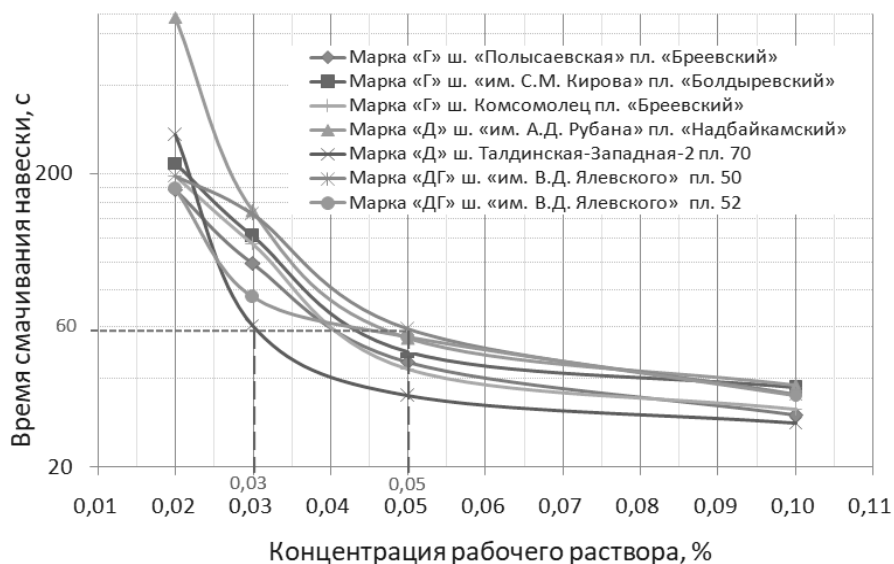


Рис. 3. Зависимость времени смачивания пыли от концентрации шахтного смачивателя [35]
 Fig. 3. Dependence of dust wetting time on concentration of mine wetting agent [35]

протекающими в поверхностном слое процессами накопления дефильных молекул растворенного активного вещества, обуславливающими быстрое уменьшение сил поверхностного натяжения на границе раздела фаз. При повышении концентрации раствора от 0,05 % до 0,1 % отмечается дальнейшее ускорение взаимодействия твердых пылевых частиц с раствором, но происходящее с меньшей интенсивностью. Наименьшее время смачивания навесок, составляющее 27–40 секунд, достигается при взаимодействии пылевидных частиц с 0,1 %-м раствором смачивателя. Оптимальная концентрация раствора для пылевидных фракций углей, относящихся к одной марке, заметно отличается для каждого шахтопласта. Например, для угля марки «Д» пл. 70 на шахте «Талдинская-Западная-2» она составляет 0,030 %. В то же время оптимальной для пылеподавления при обработке пл. «Надбайкаимский» на шахте «Имени А. Д. Рубана» является концентрация раствора сма-

чивателя, равная 0,047 %. Как видим, даже в рамках одной шахты (в частности, на шахте «Имени В. Д. Ялевского»), но на разных пластах, отличающихся своими физико-химическими свойствами, образуется пыль, смачиваемая с разной скоростью. Аналогичные зависимости были получены при проведении лабораторных исследований с другими смачивающими составами.

С целью более детального изучения факторов, влияющих на формирование пылевой обстановки в очистных забоях, были проведены натурные измерения запыленности в действующих лавах угольных шахт (табл. 3).

Горно-геологические, горнотехнические условия ведения работ, а также физико-механические и физико-химические свойства обрабатываемых углей на момент замеров приведены в табл. 4.

Используя метод корреляционно-регрессионного анализа, на основе результатов натурных замеров и сопутствующих факторов, приведенных в табл. 3 и 4 соответственно,

Таблица 3

Результаты измерения запыленности в добычных забоях на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» [составлена авторами]

The results of measuring the dust concentration in the working faces of the mines of JSC «SUEK-Kuzbass» [compiled by the authors]

Место замера	№ замера	МПК при замере пылемером, мг/м ³		Среднее значение МПК при замере пылемером, мг/м ³	
		АЭРА	ПКА	АЭРА	ПКА
Шахта «Имени А. Д. Рубана», пл. Полысаевский-2					
На месте машиниста комбайна	1	191,67	180,55	194,44	178,29
	2	183,33	164,50		
	3	208,33	189,81		
На месте машиниста крепи	4	141,67	145,90	138,89	155,01
	5	133,33	176,12		
	6	141,67	143,00		
В 10–15 м от комбайна	7	83,33	74,83	83,33	81,16
	8	75,00	90,10		
	9	91,67	78,54		
В 10–15 м от водяной завесы	10	33,33	25,60	33,33	28,60
	11	25,00	31,50		
	12	41,67	28,70		
Шахта «Талдинская-Западная-2», пл. 70					
На месте машиниста комбайна	13	187,50	195,50	184,38	200,57
	14	183,46	206,80		
	15	182,19	199,42		
На месте машиниста крепи	16	100,00	97,40	100,00	85,48
	17	75,00	80,14		
	18	125,00	78,90		
В 10–15 м от комбайна	19	33,33	33,90	25,00	39,23
	20	16,67	45,10		
	21	25,00	38,70		
В 10–15 м от водяной завесы	22	35,00	32,20	31,67	31,60
	23	28,33	34,20		
	24	31,67	28,40		
Шахта «Имени В. Д. Ялевского», пл. 52					
На месте машиниста комбайна	25	223,00	238,40	221,57	238,80
	26	215,70	241,70		
	27	226,00	236,30		
На месте машиниста крепи	28	200,00	196,90	198,67	198,17
	29	192,00	202,10		
	30	204,00	195,50		
В 10–15 м от комбайна	31	155,30	168,90	172,20	184,80
	32	167,10	201,20		
	33	194,20	184,30		
В 10–15 м от водяной завесы	34	42,10	32,70	43,33	34,40
	35	38,40	40,40		
	36	49,50	30,10		

Шахта «Имени С. М. Кирова», пл. Болдыревский					
На месте машиниста комбайна	37	57,14	55,50	47,67	42,50
	38	37,29	39,60		
	39	48,57	32,40		
На месте машиниста крепи	40	29,29	22,43	27,86	26,61
	41	22,86	28,70		
	42	31,43	28,70		
В 10–15 м от комбайна	43	44,00	34,60	40,61	40,73
	44	38,50	40,40		
	45	39,32	47,20		
В 10–15 м от водяной завесы	46	11,30	10,50	9,13	10,23
	47	7,60	8,20		
	48	8,50	12,00		

Таблица 4

Характеристика условий проведения шахтных замеров запыленности [35]

Characteristics of the conditions for conducting mine measurements of dust content [35]

Шахта / пласт	Мощность пласта, м	Коэффициент крепости угля, f	Влажность угля, W_t , %	Зольность угля, $A_{\text{эксл}}$, %	Содержание инертнита I , %	Производительность комбайна, P , т/мин	Скорость воздуха, V , м/с
«Имени А. Д. Рубана», пл. Польшаевский-2	4,7	2,5	8,5	12	8	11,99–12,15	1,15–1,38
«Талдинская-Западная-2», пл. 70	4,81	1,8	11,9	13	15	14,70–14,80	0,79–1,11
«Имени В. Д. Ялевского», пл. 52	4,34	2,5	9	13,5	15,6	20,71–20,82	2,10–3,54
«Имени С. М. Кирова», пл. Болдыревский	2,55	1,5	4,11	35,4	5	14,19–14,25	3,67

а также с учетом времени смачивания угольной пыли смачивателем «Эльфор-М» для оценки прогнозной запыленности в очистных забоях получена следующая формула:

$$C = -232,71 + 57,88 \cdot f + 0,94 \cdot t + 24,92 \cdot m + 7,73 \cdot P - 5,23 \cdot R, \quad (3)$$

где C – фактическая запыленность в замерном пункте, $\text{мг}/\text{м}^3$; f – коэффициент крепости угля, определяемый в соответствии со шкалой профессора М. М. Протодьяконова; t – время смачивания пыли, с.; m – вынимаемая мощность пласта, м; P – производительность добычного комбайна, т/мин; R – расстояние от комбайна до замерного пункта, м.

Из всей совокупности факторов, взятых для анализа, наиболее значимыми для формирования пылевой обстановки возле очистного комбайна и на расстоянии, не превышающем 15 м за ним, оказались вынимаемая мощность угольного пласта и коэффициент крепости угля, время смачивания образованной и перешед-

шей во взвешенное состояние пыли, производительность комбайна и местоположение замерной точки, определяемое расстоянием до комбайна.

Для того чтобы учитывать влияние на время смачивания углеродной пыли, вариативности ее физико-химических характеристик и корректного подбора такой концентрации раствора смачивателя, которая бы для конкретных условий позволяла обеспечить необходимую скорость пылеосаждения, предлагается уравнение следующего вида:

$$t = 33,15 - 1396,24 \cdot C_{wa} + 2,06 \cdot A^d + 1,16 \cdot Al_2O_3 + 3,07 \cdot I + 6,5 \cdot W_t^r, \quad (4)$$

где C_{wa} — концентрация смачивателя (в данном случае марки «Эльфтор-М»), %; A^d — зольность, %; Al_2O_3 — содержание оксида алюминия, %; I — содержание инертинита, %; W_t^r — влажность угля, %.

Обсуждение результатов

Большинство противопылевых мероприятий, реализуемых на угольных шахтах при ведении горных работ, предполагают использование воды (водяные и туманообразующие завесы, орошение). От скорости смачивания пылевых частиц и времени последующего пылеосаждения зависит динамика пылепереноса и фактическая запыленность в конкретной замерной точке. Угольные частицы по своей природе являются гидрофобными. Поэтому для повышения их смачиваемости и применяются растворы смачивателей, представляющих собой комбинацию ПАВ. Эффективность смачивания частиц зависит не только от их дисперсности и размера капель воды, формируемых давлением распыления и параметрами форсунок, но и от исходной влажности угля, его эксплуатационной зольности и типа золы, петрографического состава, а также от смачивающей способности и концентрации шахтного смачивателя. Принципиально важно учитывать это в первоначальный момент пылеобразования при очистной выемке и проходке выработок по пласту.

Предложенная формула (3) увязывает концентрацию взвешенной угольной пыли в лаве с параметрами обработки пласта и его свойствами. Если рассмотреть взаимосвязь концентрации пыли отдельно с каждым из факторов, то все довольно очевидно: при повышении крепости угля, мощности пласта и интенсивности ведения работ запыленность воздуха возрастает. Увеличение прочностных характеристик разрушаемого материала приводит к повышенному его истиранию, сопровождаемому образованием значительных количеств мелко- и тонкодисперсных частиц, которые долгое время остаются взвешенными в воздухе. Падение кусков угля с большей высоты, обусловленной мощностью пласта, приводит к дополнительному пылеобразованию. Взаимосвязь указанных параметров с концентрацией пыли по шкале Чеддока — сильная, коэффициенты корреляции имеют следующие значения: $r(C - f) = 0,739$, $r(C - m) = 0,553$, $r(C - P) = 0,499$. С увеличением расстояния от источника пылевыделения и уменьшением времени смачивания концентрация пыли снижается. Зависимость запыленности от данных параметров также подтверждается коэффициентами корреляции, превышающими 0,34. По мере одновременного наложения нескольких факторов не все становится столь однозначно, имеем дело с достаточно сложной многофакторной зависимостью. Рассчитанные коэффициенты в формуле (3) являются значимыми с достоверной вероятностью 90–95 %. На основании рассчитанного значения крите-

рия Фишера, составившего $F = 36,56$, вероятности неадекватности, равной $6,865 \cdot 10^{-9}\%$, и коэффициента корреляции $R > 0,92$ можно сделать вывод об адекватности полученной модели.

Математическая модель, представленная уравнением множественной линейной регрессии (формула (4)), позволяет определить время смачивания пыли в зависимости от особенностей ее химического, петрографического состава и параметров смачивания (в частности, типа используемого смачивателя и его рабочей концентрации). Модель адекватна. Доминирующее влияние на смачиваемость угольной пыли оказывает концентрация раствора смачивателя, что подтверждается соответствующим коэффициентом, величина которого в формуле максимальна. По мере увеличения концентрации ПАВ в растворе снижается поверхностное натяжение и увеличивается скорость смачивания тонкодисперсных частиц, что отражается в уменьшении времени перехода навески с поверхности раствора в его объем. Повышенное содержание в угольных частицах влаги в виде гидратных пленок, золы глиноземного типа и микрокомпонентов с более высокой плотностью по сравнению с другими (в частности, инертита и витринита) препятствует смачиваемости материала.

Таким образом, предлагаемые формулы позволяют учитывать при прогнозировании пылевой обстановки ряд специфических факторов, в значительной степени влияющих на скорость смачивания и осаждения пылевых частиц, а следовательно, позволяют получить более точные данные по концентрации пыли в воздухе забоя в интересующей точке. Стоит отметить, что приведенные формулы справедливы только в рамках варьирования параметров в указанных выше пределах и для определенных

условий. При расширении или изменении массива исходных данных требуется уточнение представленных моделей.

Заключение

В результате анализа применяемой сегодня на угледобывающих предприятиях методики по прогнозу пылевой обстановки в очистных забоях авторами сделан вывод о необходимости ее корректировки с учетом специфики процессов пылеобразования и пылесмачивания для конкретных условий отработки пластов. В качестве главного недостатка существующего подхода к определению прогнозной запыленности стоит отметить отсутствие учета влияния на ее формирование времени смачивания пыли, зависящего от ее физико-химических характеристик, типа и концентрации применяемого смачивающего состава. Значения коэффициентов эффективности противопылевых мероприятий, используемые при расчете, являются недостаточно обоснованными. Методика определения показателя удельного пылевыделения, закладываемого также в расчет, вызывает определенные сомнения в отношении ее соответствия реально протекающим процессам разрушения пласта при его отработке. Указанные аспекты снижают достоверность прогнозной оценки и влияют на корректный выбор противопылевых мероприятий, режима и параметров обеспыливания.

Оценку прогнозной запыленности следует осуществлять, учитывая смачиваемость угольной пыли и смачивающую способность рабочего раствора смачивателя, влияющих в значительной мере на процесс пылепереноса.

Вклад авторов

Корнев А. В. — генерация идеи исследования и постановка задач

исследования, проведение шахтных исследований запыленности, проведение лабораторных исследований по изучению смачиваемости угольной пыли разного состава, построение математических моделей и проверка их на адекватность, написание текста статьи.

Ледяев Н. В. — сбор данных для анализа, выполнение работы по систематизации материала, анализ результатов шахтных исследований запыленности, общая редакция статьи.

Кабанов Е. И. — анализ расчетных формул и методик по определению пылеобразующей способности угольных пластов и прогнозной запыленности, анализ результатов исследования, математическая обработка данных.

Корнева М. В. — написание статьи, проведение лабораторных исследований по изучению смачиваемости угольной пыли разного состава, математическая обработка полученных данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *Таразанов И. Г., Губанов Д. А.* Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2020 года // Уголь. — 2021. — № 3. — С. 27–43. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-3-27-43.

3. *Артемьев В. Б.* АО «СУЭК» в 2018 году — прогрессивные технологии и инновации на службе производства // Уголь. — 2019. — № 3. — С. 4–12. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-3-4-12.

4. *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.

5. *Чеботарёв А. Г.* Современные условия труда на горнодобывающих предприятиях и пути их нормализации // Горная промышленность. — 2012. — № 2 (102). — С. 84–88.

6. *Чемезов Е. Н.* Принципы обеспечения безопасности горных работ при добыче угля // Записки Горного института. — 2019. — Т. 240. — С. 649–653. DOI: 10.31897/рmi.2019.6.649.

7. *Kazanin O. I., Rudakov M. L., Kolvakh K. A.* Occupational safety and health in the sector of coal mining // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018, vol. 9, no. 6, pp. 1333–1339.

8. *Colinet J. F., Rider J. P., Listak J. M., Organiscak J. A., Wolfe A. L.* Best Practices for Dust Control in Coal Mining. 2010, no. 2010–110. Pittsburgh: DHHS (NIOSH) Publication. — 70 p.

9. *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.

10. *Colinet J. F.* The Impact of Black Lung and a Methodology for Controlling Respirable Dust // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020, vol. 37, pp. 1847–1856. DOI: 10.1007/s42461-020-00278-7.

11. *Wang W. Z., Wang Y. M., Shi G. Q.* Waveband selection within 400–4000 cm⁻¹ of optical identification of airborne dust in coal mine tunneling face // Applied Optics. 2016, vol. 55, no. 11, pp. 2951–2959.

12. *Peters S., de Klerk N., Reid A., Fritschi L., Musk A. B., Vermeulen R.* Quantitative levels of diesel exhaust exposure and the health impact in the contemporary Australian mining industry // *Occupational and Environmental Medicine*. 2017. vol. 74 (4), pp. 282–289. DOI:10.1136/oemed-2016-103808.

13. *Saarikoski S., Teinilä K., Timonen H., Aurela M., Laaksovirta T., Reyes F., Vasques Y., Oyola P., Artaxo P., Pennanen S., Junttila 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 (1), pp. 114–122. DOI: 10.1080/02786826.2017.1384788.

14. *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, iss. 02, pp. 1917–1929.

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

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

17. *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 (2), pp. 102–109. DOI: 10.1007/s40789-017-0168-z.

18. *Gonen A.* Ventilation Requirements for Today's Mechanized Underground Metal Mines. *International Journal of Advanced Research in Engineering*. 2018, vol. 4, no. 1, pp. 7–10. DOI: 10.24178/ijare.2018.4.1.07.

19. *Баловцев С. В.* Сравнительная оценка аэрологических рисков на действующих угольных шахтах // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 2–1. — С. 5–17. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-5-17.

20. *Leisle A. V., Kovalski E. R.* Assessing the well yield during methane drainage in coal mines // *Ecology, Environment and Conservation*. 2017, vol. 23, pp. 317–322.

21. *Vinogradov E. A., Nikiforov A. V., Kochneva A. A.* Computational fluid dynamics study of ventilation flow paths on longwall panel // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, vol. 10, iss. 02, pp. 1140–1147.

22. *Скопинцева О. В., Баловцев С. В.* Управление аэрологическими рисками угольных шахт на основе статистических данных системы аэрогазового контроля // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 1. — С. 78–89. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89.

23. *Barone T. L., Patts J. R., Janisko S. J., Colinet J. F., Patts L. D., Beck T. W., Mischler S. E.* Sampling and analysis method for measuring airborne coal dust mass in mixtures with limestone (rock) dust // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2016, vol. 12(4), pp. 288–296. DOI: 10.1080/15459624.2015.1116694.

24. *Suprun I., Kuznetsov V. S., Ivanov A. V.* Development of an engineer operation aimed at the reduction of atmospheric dust pollution in the decommissioning of iron-ore treatment waste // *Journal of Ecological Engineering*. 2019, vol. 20, iss. 4, pp. 23–28. DOI: 10.12911/22998993/102612.

25. *Коршунов Г. И., Сафина А. М., Каримов А. М.* Исследование и анализ источников выделения респираторной фракции пыли на угольных разрезах // *Безопасность труда в промышленности*. — 2021. — № 10. — С. 65–70. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-10-65-70.

26. *Wu T., Yang Zh., Wang A., Zhang K., Wang B.* A study on movement characteristics and distribution law of dust particles in open-pit coal mine // *Scientific Reports*. 2021, vol. 11, article 14703, pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41598-021-94131-6.

27. Shi G., Liu M., Guo Zh., Hu F., Wang D. Unsteady simulation for optimal arrangement of dedusting airduct in coal mine heading face // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017, vol. 46, pp. 45–53. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.01.011.

28. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка влияния температурных условий на естественную вентиляцию глубоких карьеров Арктической зоны // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 218–227. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.

29. Kazanin O. I., Sidorenko A. A., Sirenko Y. G. Numerical study of the air-gas dynamic processes when working out the Mosshny seam with longwall faces // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, vol. 13, no. 4, pp. 1534–1538.

30. Linh N. K., Gabov V. V., Lykov Y. V., Urazbakhtin R. Y. Evaluating the efficiency of coal loading process by simulating the process of loading onto the face conveyor with a shearer with an additional share // *International Journal of Engineering. Transactions A: Basics*. 2021, vol. 34 (7), pp. 1804–1809. DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.25.

31. Wang H., Xuan W., Zhang Zu., Qin B. Experimental investigation of the properties of dust suppressants after magnetic-field treatment and mechanism exploration // *Powder Technology*. 2019, vol. 342, pp. 149–155. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.099.

32. Wang Q. G., Wang D. M., Wang H. T., Shen Y. D., Zhu X. L. Experimental investigations of a new surfactant adding device used for mine dust control // *Powder Technology*. 2018, no. 327, pp. 303–309.

33. Jiang Z., Dou G. Preparation and Characterization of Chitosan Grafting Hydrogel for Mine-Fire Fighting // *ACS Omega*. 2020, vol. 5 (5), pp. 2303–2309. DOI: 10.1021/acsomega.9b03551.

34. 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.

35. Корнева М. В. Разработка и обоснование мероприятий по снижению концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле угольных шахт: Автореф. дис... канд. техн. наук. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – 20 с.

36. Chen X., Hu H., Xu Y., Zhang Y., Yang G. Experimental investigation of foam dedusting agent in underground coal mine // *Materials Research Innovations*. 2015, vol. 19(S8), pp. 508–511. DOI: 10.1179/1432891715z.0000000001736.

37. Скопинцева О. В., Вертинский А. С., Иляхин С. В., Савельев Д. И., Прокопович А. Ю. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах // *Горный журнал*. – 2014. – № 5. – С. 17–20. **PLAB**

REFERENCES

1. Petrenko I. E. Russia's coal industry performance for January – December, 2021. *Ugol'*. 2022, no. 3, pp. 9–23. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-1-9-23.

2. Tarazanov I. G., Gubanov D. A. Russia's coal industry performance for January – December 2020. *Ugol'*. 2021, no. 3, pp. 27–43. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-3-27-43.

3. Artem'ev V. B. JSC «SUEK» in 2018 – progressive technologies and innovations at the service of production. *Ugol'*. 2019, no. 3, pp. 4–12. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-3-4-12. [In Russ].

4. 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.

5. Chebotarjov A. G. Modern working conditions at mining enterprises and ways to normalize them. *Russian Mining Industry*. 2012, no. 2 (102), pp. 84–88. [In Russ].
6. Chemezov E. N. Industrial safety principles in coal mining. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 240, pp. 649–653. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.649.
7. Kazanin O. I., Rudakov M. L., Kolvakh K. A. Occupational safety and health in the sector of coal mining. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 6, pp. 1333–1339.
8. Colinet J. F., Rider J. P., Listak J. M., Organiscak J. A., Wolfe A. L. Best Practices for Dust Control in Coal Mining. 2010, no. 2010–110. Pittsburgh: DHHS (NIOSH) Publication. – 70 p.
9. 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.
10. Colinet J. F. The Impact of Black Lung and a Methodology for Controlling Respirable Dust. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 37, pp. 1847–1856. DOI: 10.1007/s42461-020-00278-7.
11. Wang W. Z., Wang Y. M., Shi G. Q. Waveband selection within 400–4000 cm⁻¹ of optical identification of airborne dust in coal mine tunneling face. *Applied Optics*. 2016, vol. 55, no. 11, pp. 2951–2959.
12. Peters S., de Klerk N., Reid A., Fritschi L., Musk A. B., Vermeulen R. Quantitative levels of diesel exhaust exposure and the health impact in the contemporary Australian mining industry. *Occupational and Environmental Medicine*. 2017. vol. 74 (4), pp. 282–289. DOI: 10.1136/oemed-2016–103808.
13. 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 (1), pp. 114–122. DOI: 10.1080/02786826.2017.1384788.
14. 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, iss. 02, pp. 1917–1929.
15. Rodionov V. A., Tursenev S. A., Skripnik I. L., Ksenofontov Y. G. Results of the study of kinetic parameters of spontaneous combustion of coal dust. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 246, pp. 617–622. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.
16. Gendler S. G., Gabov V. V., Babyr N. V., Prokhorova E. A. Justification of engineering solutions on reduction of occupational traumatism in coal longwalls. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 5–19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_5.
17. 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 (2), pp. 102–109. DOI: 10.1007/s40789-017-0168-z.
18. Gonen A. Ventilation Requirements for Today's Mechanized Underground Metal Mines. *International Journal of Advanced Research in Engineering*. 2018, vol. 4, no. 1, pp. 7–10, DOI: 10.24178/ijare.2018.4.1.07.
19. Balovtsev S. V. Comparative assessment of aerological risks at operating coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2–1, pp. 5–17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-5-17.
20. Leisle A. V., Kovalski E. R. Assessing the well yield during methane drainage in coal mines. *Ecology, Environment and Conservation*. 2017, vol. 23. pp. 317–322.
21. Vinogradov E. A., Nikiforov A. V., Kochneva A. A. Computational fluid dynamics study of ventilation flow paths on longwall panel. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, vol. 10, iss. 02, pp. 1140–1147.

22. Skopintseva O. V., Balovtsev S. V. Air quality control in coal mines based on gas monitoring statistics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 1, pp. 78–89. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89.
23. Barone T. L., Patts J. R., Janisko S. J., Colinet J. F., Patts L. D., Beck T. W., Mischler S. E. Sampling and analysis method for measuring airborne coal dust mass in mixtures with limestone (rock) dust. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene.* 2016, vol. 12(4), pp. 288–296. DOI: 10.1080/15459624.2015.1116694.
24. Suprun I., Kuznetsov V. S., Ivanov A. V. Development of an engineer operation aimed at the reduction of atmospheric dust pollution in the decommissioning of iron-ore treatment waste. *Journal of Ecological Engineering.* 2019, vol. 20, iss. 4, pp. 23–28. DOI: 10.12911/22998993/102612.
25. Korshunov G. I., Safina A. M., Karimov A. M. Research and Analysis of the Sources of Emission of Respirable Fraction of Dust at the Coal Mines. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti.* 2021, vol. 10, pp. 65–70. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-10-65-70.
26. Wu T., Yang Zh., Wang A., Zhang K., Wang B. A study on movement characteristics and distribution law of dust particles in open-pit coal mine. *Scientific Reports.* 2021, vol. 11, article 14703, pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41598-021-94131-6.
27. Shi G., Liu M., Guo Zh., Hu F., Wang D. Unsteady simulation for optimal arrangement of dedusting airduct in coal mine heading face. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2017, vol. 46, pp. 45–53. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.01.011.
28. Gendler S. G., Borisovsky I. A. Estimated impact of temperature conditions on deep pits natural ventilation in the Arctic. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2022;14(2):218-227. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.
29. Kazanin O. I., Sidorenko A. A., Sirenko Y. G. Numerical study of the air-gas dynamic processes when working out the Mosshny seam with longwall faces. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2018, vol. 13, no. 4, pp. 1534–1538.
30. Linh N. K., Gabov V. V., Lykov Y. V., Urazbakhtin R. Y. Evaluating the efficiency of coal loading process by simulating the process of loading onto the face conveyor with a shearer with an additional share. *International Journal of Engineering. Transactions A: Basics.* 2021, vol. 34 (7), pp. 1804–1809. DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.25.
31. Wang H., Xuan W., Zhang Zu., Qin B. Experimental investigation of the properties of dust suppressants after magnetic-field treatment and mechanism exploration. *Powder Technology.* 2019, vol. 342, pp. 149–155. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.099.
32. Wang Q. G., Wang D. M., Wang H. T., Shen Y. D., Zhu X. L. Experimental investigations of a new surfactant adding device used for mine dust control. *Powder Technology.* 2018, no. 327, pp. 303–309.
33. Jiang Z., Dou G. Preparation and Characterization of Chitosan Grafting Hydrogel for Mine-Fire Fighting. *ACS Omega.* 2020, vol. 5 (5), pp. 2303–2309. DOI: 10.1021/acsomega.9b03551.
34. 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.
35. Korneva M. V. Development and justification of measures to reduce the concentration of fine fractions in the dust aerosol of coal mines: Abstract of the thesis. dis... cand. tech. Sciences. St. Petersburg: Saint Petersburg Mining University, 2020, 20 p. [In Russ].
36. Chen X., Hu H., Xu Y., Zhang Y., Yang G. Experimental investigation of foam dedusting agent in underground coal mine. *Materials Research Innovations.* 2015, vol. 19(S8), pp. 508–511. DOI: 10.1179/1432891715z.0000000001736.
37. Skopintseva O. V., Vertinskiy A. S., Ilyakhin S. V., Savelev D. I., Prokopovich A. Yu. Substantiation of efficient parameters of dust-controlling processing of coal massif in mines. *Gornyi Zhurnal.* 2014, no. 5, pp. 17–20. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корнев Антон Владимирович — канд. техн. наук, заведующий лабораторией, доцент кафедры безопасности производств, <https://orcid.org/0000-0001-6371-9969>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: Kornev_AV@pers.spmi.ru;

Ледяев Николай Владимирович — начальник управления противоаварийной устойчивости предприятий, АО «СУЭК-Кузбасс», 652507, г. Ленинск-Кузнецкий, ул. Васильева, д. 1, Россия, e-mail: ledyaevnv@suek.ru;

Кабанов Евгений Игоревич — канд. техн. наук, ассистент кафедры безопасности производств, <https://orcid.org/0000-0001-7580-9099>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: Kabanov_EI@pers.spmi.ru;

Корнева Мария Валерьевна — канд. техн. наук, ведущий инженер отдела методического обеспечения учебного процесса, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: Korneva_MV@pers.spmi.ru.

Для контактов: *Корнев Антон Владимирович*, e-mail: Kornev_AV@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kornev A. V., Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Associate Professor at the Department of Industrial Safety, <https://orcid.org/0000-0001-6371-9969>, Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21st Line V. I., 2, Russia, e-mail: Kornev_AV@pers.spmi.ru;

Ledyaev N. V., Head of Enterprise Emergency Stability Department, JSC «SUEK-Kuzbass», 652507, Leninsk-Kuzneckij, Vasil'eva, 1, Russia, e-mail: ledyaevnv@suek.ru;

Kabanov E. I., Cand. Sci. (Eng.), Assistant at the Department of Industrial Safety, <https://orcid.org/0000-0001-7580-9099>, Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21st Line V. I., 2, Russia, e-mail: Kabanov_EI@pers.spmi.ru;

Korneva M. V., Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of the Department of Methodological Support of the Educational Process, Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21st Line V. I., 2, Russia, e-mail: Korneva_MV@pers.spmi.ru.

The contact person: *Kornev A. V.*, e-mail: Kornev_AV@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 29.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 29.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

