

## УСТАНОВКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ НА КАРЬЕРАХ ОТКРЫТОГО ТИПА ПУТЕМ ОРОШЕНИЯ

Ковшов С. В., Гридина Е. Б., Иванов В. В.

## INSTALLATION FOR MODELING THE PROCESS OF DUST SUPPRESSION IN OPEN-PIT MINES BY WETTING

Kovshov S. V., Gridina E. B., Ivanov V. V.

### Аннотация

**Введение:** угольная пыль, образующаяся при добыче полезных ископаемых, является главным вредным фактором производства и способна участвовать в образовании взрывоопасных смесей. Одним из эффективных методов пылеподавления является орошение пыли водой. Цель исследования — определение оптимальных параметров пылеподавления: давления воды и диаметра форсунки, исследование уровня запыленности при изменении скорости ветра, определение эффективности пылеподавления. **Методы и материалы:** создание лабораторной установки для орошения пыли, моделирование процесса гидропылеподавления — варьирование давления воды, диаметра форсунки и скорости ветра. **Результаты:** установлено, что чем выше давление подачи воды и больше диаметр форсунки распыла, тем ниже концентрация пыли в лабораторном стенде. При этом существенную роль играет скорость ветра — максимальный скачок в уровне запыленности достигается при росте скорости ветра от 2 до 4 м/с. Эффективность обеспыливания увеличивается с 82 % при давлении воды 60 бар и диаметре форсунки 0,2 мм до 92 % при давлении воды 120 бар и диаметре форсунки 0,6 мм. Дальнейшее увеличение давления нецелесообразно вследствие значительного роста энергозатрат. **Практическая значимость:** предлагаемый принцип очистки от пыли может быть внедрен на карьерах с большим содержанием грунтовых вод. Затраты на очистку карьерных вод довольно велики. Используя простейшую фильтрацию карьерной воды с последующим орошением пылевых поверхностей по системе «труба – шланг – форсунка», можно добиться эффективного обеспыливания добычного борта и карьерных автодорог. Таким образом, нет необходимости во внешнем источнике воды и очистке карьерных вод, что обуславливает экономический эффект.

**Ключевые слова:** карьер, пылеподавление, пыль, форсунка, орошение.

### Введение

Пыль является одним из главнейших загрязнителей воздуха, например, при перевалке грузов в морских портах [1], и особенно при добыче полезных ископаемых открытым способом. Без ис-

### Abstract

**Introduction:** coal dust formed during mining is the main harmful factor of production and is able to participate in the formation of explosive mixtures. One of the effective methods of dust suppression is wetting the dust with water. Purpose of research is to determine the optimal parameters of dust suppression: water pressure and diameter of spray nozzles, investigation of the level of dustiness with changing wind speed, determination of dust suppression efficiency. **Methods and materials:** creation of a laboratory installation for dust wetting, simulation of the process of hydro-dust suppression: changing the water pressure, spray nozzle diameter and wind speed. **Results:** it is established that the higher the water supply pressure and the larger the nozzle diameter of the spray, the lower the dust concentration in the laboratory bench. In this case, an essential role is played by wind speed: the maximum jump in the level of dustiness is achieved with an increase in wind speed from 2 m/s to 4 m/s. The dust suppression efficiency is increased from 82 % at water pressure of 60 bar and spray nozzle diameter of 0.2 mm to 92 % at water pressure of 120 bar and spray nozzle diameter of 0.6 mm. Further increase in pressure is not advisable, due to a significant increase in energy costs. **Practical significance:** the proposed principle of dust suppression can be implemented in mines with a high content of groundwater. The cost of cleaning the quarry waters is pretty high. Using the simplest filtration of quarry water with the subsequent wetting of dust surfaces through the “pipe-hose-spray” system, it is possible to achieve effective dust suppression of the mining side and quarry roads. Thus, there is no need for an external source of water and treatment of quarry water, which causes an economic effect.

**Keywords:** mine, dust suppression, dust, spray nozzle, wetting.

пользования средств пылеподавления концентрация пыли в рабочей зоне открытой шахты может достигать значений, превышающих максимально допустимые нормы [2]. Предлагается использовать орошение для пылеподавления с участием

клеящей добавки — сапропеля. Отмечается хорошая биоэффективность метода [3]. Для пылесвязывания предлагается создание на пылящих поверхностях защитного слоя с применением раствора натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ) [4], что является относительно дешевым и безопасным методом. Возможно сочетание Na-КМЦ с биогумусом, что впоследствии будет способствовать созданию вторичной экосистемы на нарушенных техногенных массивах [5]. Для обработки автодорог предлагается использование водного раствора Na-КМЦ с добавкой «Универсина» — пылесвязывающего средства на основе углеводородного сырья. Обработка таким раствором производится быстрее, чем аналогами; создается покрытие, не разрушаемое даже тяжелыми грузовиками и позволяющее связывать свежую пыль в течение 15 дней [6]. Структура добавки может быть модифицирована атактическим полипропиленом или с помощью окисления [19]. В зависимости от обрабатываемых поверхностей применяются различные пылесвязывающие агенты на основе акриловых полимеров, лигносульфонатов, латекса и др. [20]. Для обработки штабелей угля в Усть-Лужском порту с целью пылеподавления и предотвращения смерзания породы предлагается использовать раствор хлористого кальция [7].

Как известно, орошение или увлажнение — один из наиболее широко распространенных методов пылеподавления. Его несомненными преимуществами являются техническая простота реализации, относительно низкая стоимость, доступность ресурсов. Выделяют различные виды орошения: высоконапорное, низконапорное, пневмогидроорошение, водяные и туманообразующие завесы [8]. Существует также пароконденсационный способ пылеподавления, особенно эффективный в зимнее время. Пар под давлением разрывает струю перегретой воды, превращая ее в факел мелкодисперсного аэрозоля [9]. Отмечается, что зимнее время особенно опасно для здоровья горнорабочих, так как увеличение энергозатрат ведет к увеличению частоты дыхания, следовательно, больше пыли оседает на легких, таким образом, риск профзаболеваний увеличивается в 1,5 раза [10]. Для использования в зимних условиях предлагается инновационная форма форсунки для пылеподавления снегом. Пылевые частицы при отрицательных температурах выступают цен-

трами кристаллизации, соединяются с частицами воды, происходит образование искусственного снега [11]. Предлагается также аэропневматический метод пылеподавления с использованием пен высокой кратности, включающих в состав поверхностно-активные вещества. Метод характеризуется высокой эффективностью [12]. Для осуществления такого способа может быть использована пневматическая пенная система с засасыванием пенного агента из танка вакуумом, создаваемым проходящей воздушной струей [13].

На основе сопла Лавалья была сконструирована форсунка, определены оптимальные параметры ее работы: диаметр форсунки, объем и давление воды. Был смонтирован специальный бункер пылеподавления. Отмечается, что на современных предприятиях применяют от 4 до 6 форсунок спринклерного типа [14]. Определение эффективности пылеосаждения может осуществляться не только гравиметрическим способом, но и в потоке, с помощью аэрозольного спектрометра с поляризацией. Выяснено, что давление воды оказывает значительное влияние на эффективность пылеподавления. Увеличение давления способствует увеличению скорости водяных капель и снижению их диаметра [15]. В работе [16] учитывается влияние вытяжной вентиляции на внешнюю систему пылеорошения. Ветровая стена создает систему вихрей, нарушающих контакт воды и пыли. Для решения проблемы необходимо подбирать оптимальное давление воды [16]. Выбор смачивающего агента (ПАВ) и его концентрация индивидуальны для обработки пыли от углей разного типа и даже угля одного типа, но из разных шахт [17]. Например, лигниты содержат 66 % гидрофильных групп и, соответственно, показывают хорошее сродство к воде. Пыль газовых углей содержит компактные ароматические соединения, а также до 50 % кислородсодержащих групп, что обуславливает среднюю гидрофильность. Ароматическая составляющая антрацитов представлена антраценами и фенантренами, имеющими в составе три ароматических кольца и незначительное количество кислородсодержащих групп. Таким образом, антрациты очень плохо поддаются смачиванию водой. Для смачивания антрацитов можно использовать полиэфирное неионогенное ПАВ АЕО-9, имеющее сходную с антрацитами струк-

туру гидрофобной части (подобное растворяет подобное) [18].

### Методы и материалы

С целью апробации предлагаемого технического решения гидропылеподавления на базе Горного университета спроектирован и собран макет стенда. Стенд состоит из основного корпуса, в котором имеется возможность имитировать пылеперенос в полуоткрытом (рис. 1, а) и закрытом (рис. 1, б) режимах, по верхним бортам которого протянута система шлангов со встраиваемыми форсунками (рис. 2, а), через которую подается вода. Такая система питается за счет стационарной подачи воды (рис. 2, б), а давление воды регулируется компрессорным насосом (рис. 2, в).

Для определения различных параметров пылеобразования и пылепереноса при работе с экспериментальным стендом используется следующее оборудование:

1. Для анализа фракционного состава пыли, а также распределения объема пылевых частиц различного фракционного состава применяется счетчик пылевых частиц ДТ-9880 (рис. 3, а).

2. Для определения концентрации пыли гравиметрическим (весовым) методом на различных экспериментальных этапах используется аспиратор АВП-12 со встроенным анемометром (рис. 3, б), имеющий возможность трехканального отбора проб пыли с помощью аспирационных фильтров АФА-ВП-10 или АФА-ВП-20.

После просасывания запыленного воздуха фильтр извлекают из аллонжа, повторно взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,1 мг и определяют массу навески пыли  $\Delta P$  на фильтре по разности масс «чистого» и «грязного» фильтров.

Концентрация пыли при рабочих условиях:

$$C_{p.y} = \frac{\Delta P}{V_{зам}}, \text{ мг/м}^3$$

где  $\Delta P = P_k - P_n$  — масса уловленной фильтром пыли, мг;  $P_n$  и  $P_k$  — масса фильтра АФА соответственно до и после аспирации, мг;  $V_{зам}$  — объем воздуха, из которого выделили пыль на фильтре, м<sup>3</sup>.

Одновременно с отбором проб воздуха на запыленность измеряют температуру ( $T$ , °С) и давление воздуха ( $B$ , мм рт. ст.) для приведения объема воздуха при рабочих условиях  $V_{зам}$ , из которого выделили пыль на фильтре, к стандартным условиям (760 мм рт. ст. и 20 °С):

$$V_{прив} = 0,386 \frac{V_{зам} \cdot B}{273 + T}, \text{ м}^3$$

Тогда концентрация пыли в воздухе при стандартных условиях:

$$C = \frac{\Delta P}{V_{прив}}, \text{ мг/м}^3.$$

Эффективность обеспыливания:

$$\eta = (C_0 - C_1) / C_0 \cdot 100 \%,$$

где  $C_0$  — концентрация пыли без средств пылеподавления;  $C_1$  — концентрация пыли при использовании орошения.

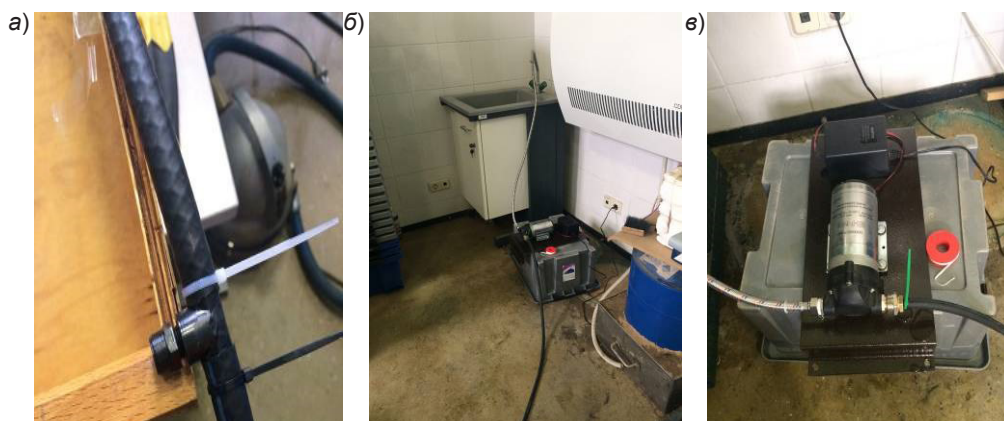


Рис. 2. Система подачи воды и орошения экспериментального стенда: а — одна из базовых 6 форсунок для распыления воды (можно варьировать от 1 до 6 форсунок с 4 различными диаметрами распыла); б — подача воды от стационарной системы водоснабжения; в — компрессор для регулирования уровня давления



Рис. 1. Режимы работы станда: а — полуоткрытый, б — замкнутый

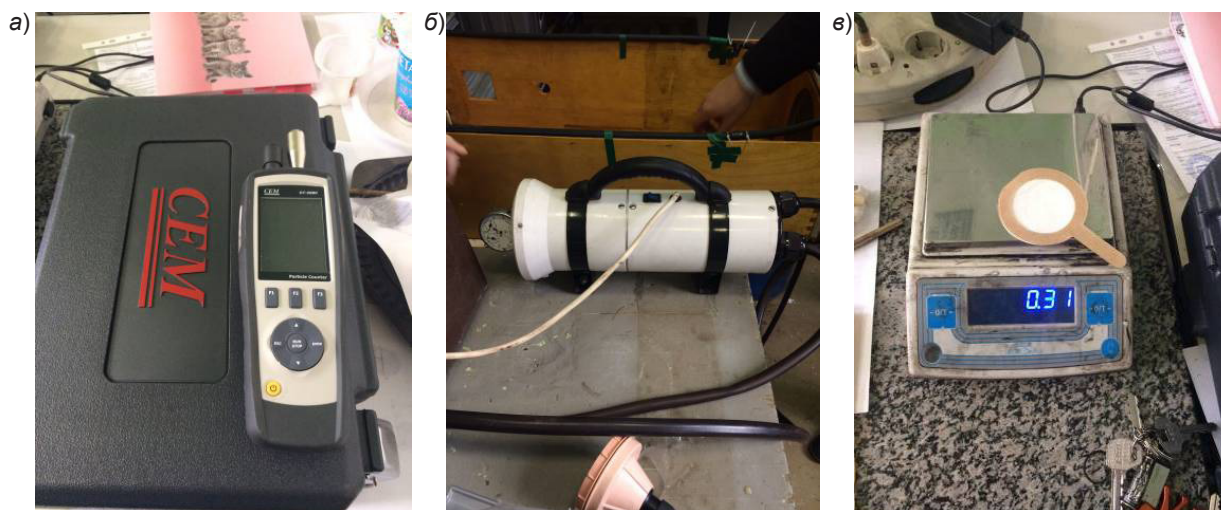


Рис. 3. Приборная база для определения параметров запыленности воздуха: а — счетчик пылевых частиц DT 9880; б — аспиратор АВП-12; в — фильтр АФА-ВП-20 в аллонже на измерительных весах

3. Для определения сопутствующих микроклиматических параметров (температура и влажность воздуха, скорость движения воздуха, атмосферное давление) применяется микроклиматическая экспресс-лаборатория МЭС-200 (рис. 4).

#### Результаты и обсуждение

Для оценки эффективности автоматизированной системы пылеподавления была смоделирована аэротехногенная обстановка в карьерном пространстве.



Рис. 4. Экспресс-лаборатория МЭС-200 для определения сопутствующих микроклиматических параметров эксперимента

Таблица 1

**Результаты ситового анализа**

Порядковый номер сита	Размер отверстий, мкм	Остаток на каждом сите, % по массе	Суммарный остаток на всех ситах, % по массе
1	1600	30,74	30,74
2	630	10	40,74
3	400	45,45	86,19
4	200	4,87	91,06
5	140	8,31	99,37
6	71	0,63	100

На дне лабораторной установки была рассыпана навеска угольных частиц, полученных перемалыванием 50 кг угля марки БР, взятого во время полевых исследований аэротехногенной обстановки.

По данным лабораторных исследований фракционного пылящего материала ситовым методом было установлено, что исходный дисперсный материал представлен в основном частицами диаметром 1,6–0,071 мм.

В табл. 1 приведен пример полной записи результатов ситового анализа. Из таблицы видно, что исследуемый пылящий угольный материал в большей степени состоит из частиц, представляющих собой мелкую пыль размером 0,4 мм. В основном преобладают частицы сферической формы.

В лабораторной установке была смоделирована условная стационарная пылящая поверхность. Ее площадь составила 180 см<sup>2</sup>, общая масса навески пылящего материала составляла 20–25 г. Дисперсный состав отвала был представлен частицами 1,6–0,71 мм (в основном 0,4 мм). Лабораторный стенд продувался в течение 5 минут при скорости ветра 2–10 м/с. Первая часть экспериментов состояла из 5 этапов, повторность опытов каждого этапа — шестикратная. При этом с помощью аспиратора АВП-12 и аспирационных фильтров АФА-ВП-20 по описанной методике осуществлялся анализ концентрации пыли. Результаты эксперимента занесены в табл. 2.

Основной задачей второй части эксперимента служило определение рациональных параметров гидрообеспыливания, осуществляемого системой шлангов со встраиваемыми форсунками (диаметры сопла 0,2, 0,4, 0,6 мм) при двух различных уровнях давления при подаче воды: 60 бар и 120 бар. Создание заданной аэротехно-

Таблица 2

**Результаты экспериментальных исследований запыленности без средств пылеподавления**

№	Скорость, м/с	Средняя концентрация пыли, мг/м <sup>3</sup>
1	2	7,4
2	4	10,2
3	6	11,4
4	8	11,9
5	10	12,3

генной ситуации и определение концентрации пыли осуществлялось таким же образом, как и в первой части эксперимента. Результаты эксперимента отражены на рис. 5.

Анализ полученных результатов (см. рис. 5) подтверждает гипотезу о том, что параметры системы гидрообеспыливания существенным образом влияют на формируемую аэротехногенную обстановку: чем выше давление подачи воды и больше диаметр форсунки распыла, тем ниже концентрация пыли в лабораторном стенде. Однако такой результат достигается более значительными затратами энергии и воды. При этом существенную роль играет скорость ветра: максимальный скачок в уровне запыленности достигается при росте скорости ветра от 2 до 4 м/с.

В табл. 3 представлены рассчитанные значения эффективности обеспыливания.

Как видно из табл. 3, возможно повышение эффективности обеспыливания с 82–84 % до 91–92 % при увеличении давления при подаче воды с 60 до 120 бар и диаметра форсунки с 0,2 до 0,6 мм.

Однако дальнейшее увеличение давления нецелесообразно по нескольким причинам:

- при незначительном росте эффективности пылеподавления происходит существенное уве-

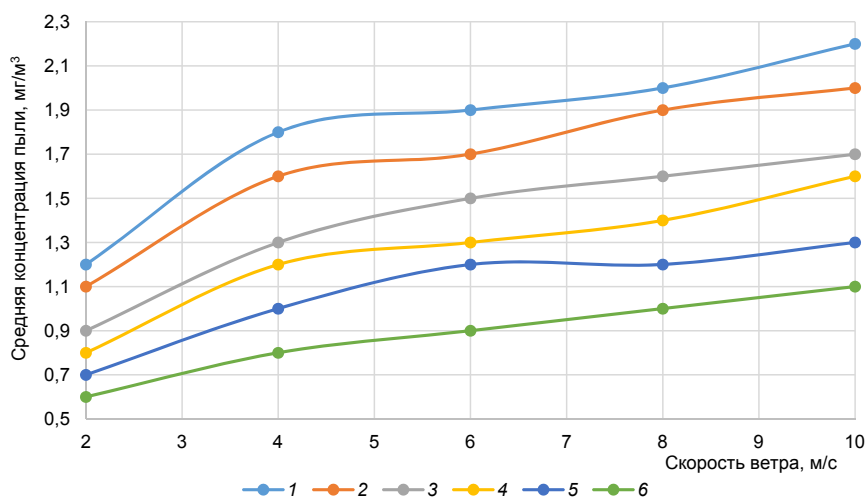


Рис. 5. Зависимость средней концентрации пыли от диаметра форсунки  $d$  при давлениях воды  $p$ : 1 —  $p = 60$  бар;  $d = 0,2$  мм; 2 —  $p = 60$  бар;  $d = 0,4$  мм; 3 —  $p = 60$  бар;  $d = 0,6$  мм; 4 —  $p = 120$  бар;  $d = 0,2$  мм; 5 —  $p = 120$  бар;  $d = 0,4$  мм; 6 —  $p = 120$  бар;  $d = 0,6$  мм

Таблица 3

**Эффективность обеспыливания при варьировании давления подачи воды и диаметра форсунки**

Давление при подаче воды, бар	Диаметр распыла форсунки, мм	Скорость ветра, м/с				
		2	4	6	8	10
60	0,2	84	82	83	83	82
	0,4	85	84	85	84	84
	0,6	88	87	87	87	86
120	0,2	89	88	89	88	87
	0,4	91	90	89	90	89
	0,6	92	92	92	92	91

личение энергозатрат на работу компрессорных (насосных) установок, подающих воду;

- дальнейшее увеличение давления требует изменения в системе шлангов и трубок, что также повысит затраты на проект.

Разница в стоимости форсунок различного диаметра фактически отсутствует, поэтому общей рекомендацией для таких систем может быть выбор форсунки с диаметром 0,6 мм.

**Заключение**

Установлено, что увеличение давления подачи воды с 60 до 120 бар и диаметра форсунки с 0,2 до 0,6 мм ведет к снижению средней концентрации пыли примерно в два раза. Большое значение имеет скорость ветра: при увеличении скорости ветра от 2 до 10 м/с наблюдается увеличение концентрации пыли, максимальный скачок запыленности отмечен при увеличении скорости ветра от 2 до 4 м/с.

Рассчитана эффективность процесса пылеподавления. Она может быть увеличена с 82–84 % при минимальном использованном давлении 60 бар и диаметре форсунки 0,2 мм на 8–10 % при увеличении давления до 120 бар и диаметра форсунки до 0,6 мм.

Предлагаемая схема гидропылеподавления может быть применена на карьерах с большой обводненностью днища. В частности, на карьере Дубровке ежесуточный выход подземных вод составляет до 10–12 м<sup>3</sup>, кроме того, приход воды вместе с осадками фактически повышает среднесуточный объем образования воды до 15–20 м<sup>3</sup>. Вся эта водная масса через систему водоотводящих каналов направляется в специальный зумф воды и далее на первичную очистку и последующий сброс в местную реку. Процесс очистки довольно дорог.

В качестве альтернативы предлагается система, включающая автоматизированный забор воды из зумфа, ее простейшую фильтрацию с последующим распылением с помощью системы «труба – шланг – форсунка». Основным объектом такого обеспыливания – карьерные автомобильные дороги, а также добычной борт. Таким образом, достигается экономический эффект.

#### Литература

1. Kovshov, S., Barkan, M. (2016). Reduction of Dust Emission in Transshipping Processes at Sea Ports. *International Journal of Ecology & Development*, 31(2), pp. 50–59.
2. Korshunov, G. I., Kovshov, S. V., Safina, A. M. (2017). Dust control methods in open-pit mining. Current state of physical & chemical research. *Ecology, Environment and Conservation*, vol. 23, issue 2, pp. 883–889.
3. Шувалов, Ю. В., Ильченкова, С. А., Гаспарьян, Н. А., Бульбашев, А. П. (2004). Снижение пылеобразования и переноса пыли при разрушении горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 10, сс. 75–78.
4. Gendler, S. G., Kovshov, S. V. (2016). Investigation into Adhesive Properties of Sodium Carboxymethyl Cellulose Aiming at Development of Dust Suppression Layer. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 7(1), pp. 2084–2090.
5. Kovshov, S. V., Kovshov, V. P. (2014). Biogenic Fixation of Dusting Surfaces. *Life Science Journal*, 11 (9), pp. 401–404.
6. Gendler, S., Kovshov, S. (2016). Estimation and Reduction of Mining-Induced Damage of the Environment and Work Area Air in Mining and Processing of Mineral Stuff for the Building Industry. *Eurasian Mining*, 1, pp. 45–49.
7. Коршунов, Г. И., Ковшов, В. П., Ковшов, С. В., Ерзин, А. Х. (2014). Новый химический способ пылеподавления при складировании горной массы. *Записки Горного института*, 207, сс. 116–120.
8. Коршунов, Г. И., Мазаник, Е. В., Ерзин, А. Х., Корнев, А. В. (2014). Эффективность применения поверхностно-активных веществ для борьбы с угольной пылью. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 3, сс. 55–61.
9. Смирнов, Ю. Д., Каменский, А. А., Иванов, А. В. (2010). Использование пароконденсационного способа пылеподавления при различных технологических операциях добычи полезных ископаемых. *Записки Горного института*, 186, сс. 82–85.
10. Смирнов, Ю. Д., Иванов, А. В. (2013). Определение оптимальных параметров пневмогидравлической форсунки для наиболее экономичного и эффективного пылеподавления. *Записки Горного института*, 203, сс. 98–103.
11. Смирнов, Ю. Д., Ковшов, С. В., Иванов, А. В. (2012). Разработка инновационного пылеподавляющего устройства для условий северных регионов. *Записки горного института*, 195, сс. 133–137.
12. Каменский, А. А. (2011). Исследования коагуляции пылевой фракции при применении аэропенного спо-

соба пылеподавления. *Записки Горного института*, 189, сс. 138–140.

13. Wang, D., Lu, X., Wang, H., Chen, M. (2016). A new design of foaming agent mixing device for a pneumatic foaming system used for mine dust suppression. *International journal of mining science and technology*, 26(2), сс. 187–192.

14. Далбаева, Е. П. (2014). Обоснование эффективных мер борьбы с пылью на карьерах криолитозоны. *Записки Горного института*, 207, сс. 110–111.

15. Seaman, C. E., Shahan, M. R., Beck, T. W., Mischler, S. E. (2018). Comparison of the CAS-POL and IOM samplers for determining the knockdown efficiencies of water sprays on float coal dust. *Journal of occupational and environmental hygiene*, vol. 15, issue 3, pp. 214–225.

16. Wang, H., Wang, C., Wang, D. (2017). The influence of forced ventilation airflow on water spray for dust suppression on heading face in underground coal mine. *Powder Technology*, 320, pp. 498–510.

17. Cybulski, K., Malich, B., Wieczorek, A. (2015). Evaluation of the effectiveness of coal and mine dust wetting. *Journal of Sustainable Mining*, 14(2), pp. 83–92.

18. Yao, Q., Xu, C., Zhang, Y., Zhou, G., Zhang, S., & Wang, D. (2017). Micromechanism of coal dust wettability and its effect on the selection and development of dust suppressants. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, pp. 726–732.

19. Kovshov, S., Kovshov, V. (2015). Chemical Technology of Dust Suppression on Open-Pit Mines. *International Journal of Ecology & Development*, 30(3), pp. 55–67.

20. Kovshov, S., Erzlin, A., Kovshov, V. (2015). Bonding dust with environmentally safe compositions on open dust-forming surfaces in coal producing enterprises. *International Journal of Ecology & Development*, 30(1), pp. 11–23.

#### References

1. Kovshov, S., Barkan, M. (2016). Reduction of Dust Emission in Transshipping Processes at Sea Ports. *International Journal of Ecology & Development*, 31(2), pp. 50–59. (in Russian).
2. Korshunov, G. I., Kovshov, S. V., Safina, A. M. (2017). Dust control methods in open-pit mining. Current state of physical & chemical research. *Ecology, Environment and Conservation*, vol. 23, issue 2, pp. 883–889. (in Russian).
3. Shuvalov, Yu. V., Il'chenkova, S. A., Gaspar'yan, N. A., & Bul'bashev, A. P. (2004). Snizheniye pyleobrazovaniya i perenosa pyli pri razrushenii gornykh porod [Reduction of dust formation and dust transfer in the destruction of rocks]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 10, pp. 75–78. (in Russian).
4. Gendler, S. G., Kovshov, S. V. (2016). Investigation into Adhesive Properties of Sodium Carboxymethyl Cellulose Aiming at Development of Dust Suppression Layer. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 7(1), pp. 2084–2090.
5. Kovshov, S. V., Kovshov, V. P. (2014). Biogenic Fixation of Dusting Surfaces. *Life Science Journal*, 11 (9), pp. 401–404.
6. Gendler, S., Kovshov, S. (2016). Estimation and Reduction of Mining-Induced Damage of the Environment and Work Area Air in Mining and Processing of Mineral Stuff for the Building Industry. *Eurasian Mining*, 1, pp. 45–49.

7. Korshunov, G. I., Kovshov, V. P., Kovshov, S. V., Yerzin, A. Kh. (2014). Novyj himicheskij sposob pylepodavleniya pri skladirovanii gornoj massy [A New Chemical Method of Dust Suppression for the Storage of the Rock Mass]. *Journal of Mining Institute (Zapiski Gornogo instituta)*, 207, pp. 116–120. (in Russian).
8. Korshunov, G. I., Mazanik, E. V., Yerzin, A. Kh., Kornev, A. V. (2014). Effektivnost' primeneniya poverkhnostno-aktivnykh veshchestv dlya bor'by s ugol'noy pyl'yu [The effectiveness of the use of surfactants to combat coal dust]. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, 3, pp. 55–61. (in Russian).
9. Smirnov, Yu. D., Kamenskiy, A. A., Ivanov, A. V. (2010). Ispol'zovanie parokondensacionnogo sposoba pylepodavleniya pri razlichnykh tekhnologicheskikh operaciyah dobychi poleznykh iskopaemykh. [Using of Steam Condensing Way of Dust-Depressing in Different Manufacturing Operations During Mining]. *Journal of Mining Institute (Zapiski Gornogo instituta)*, 186, pp. 82–85. (in Russian).
10. Smirnov, Yu. D., Ivanov, A. V. (2013). Opredelenie optimal'nykh parametrov pnevmogidravlicheskoj forsunki dlya naibolee ehkonomichnogo i ehffektivnogo pylepodavleniya [The Identification Optimal Parameters of Pneumohydraulic Sprayer for the Most Economical and Effective Dust Suppression]. *Journal of Mining Institute (Zapiski Gornogo instituta)*, 203, pp. 98–103. (in Russian).
11. Smirnov, Yu. D., Kovshov, S. V., Ivanov, A. V. (2012). Razrabotka innovacionnogo pylepodavlyayushchego ustrojstva dlya uslovij severnykh regionov [Working out Innovative Dust Control Devices for Conditions of Northern Regions]. *Journal of Mining Institute (Zapiski Gornogo instituta)*, 195, pp. 133–137. (in Russian).
12. Kamenskiy, A. A. (2011). Issledovaniya koagulyacii pylevoj frakcii pri primenении aehropennogo sposoba pylepodavleniya [Researches of Coagulation of Dust Fraction at Application of the Aerofoamy Way of Dust-Depressing]. *Journal of Mining Institute (Zapiski Gornogo instituta)*, 189, pp. 138–140. (in Russian).
13. Wang, D., Lu, X., Wang, H., Chen, M. (2016). A new design of foaming agent mixing device for a pneumatic foaming system used for mine dust suppression. *International journal of mining science and technology*, 26(2), pp. 187–192.
14. Dalbayeva, E. P. (2014). Obosnovanie ehffektivnykh mer bor'by s pyl'yu na kar'erah kriolitozony [Justification of Effective Dust Control in the Open-Pits of Cryolithozone]. *Journal of Mining Institute (Zapiski Gornogo instituta)*, 207, pp. 110–111. (in Russian).
15. Seaman, C. E., Shahan, M. R., Beck, T. W., & Mischler, S. E. (2018). Comparison of the CAS-POL and IOM samplers for determining the knockdown efficiencies of water sprays on float coal dust. *Journal of occupational and environmental hygiene*, vol. 15, issue 3, pp. 214–225.
16. Wang, H., Wang, C., Wang, D. (2017). The influence of forced ventilation airflow on water spray for dust suppression on heading face in underground coal mine. *Powder Technology*, 320, pp. 498–510.
17. Cybulski, K., Malich, B., Wieczorek, A. (2015). Evaluation of the effectiveness of coal and mine dust wetting. *Journal of Sustainable Mining*, 14(2), pp. 83–92.
18. Yao, Q., Xu, C., Zhang, Y., Zhou, G., Zhang, S., Wang, D. (2017). Micromechanism of coal dust wettability and its effect on the selection and development of dust suppressants. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, pp. 726–732.
19. Kovshov, S., Kovshov, V. (2015). Chemical Technology of Dust Suppression on Open-Pit Mines. *International Journal of Ecology & Development*, 30(3), pp. 55–67.
20. Kovshov, S., Erzin, A., Kovshov, V. (2015). Bonding dust with environmentally safe compositions on open dust-forming surfaces in coal producing enterprises. *International Journal of Ecology & Development*, 30(1), pp. 11–23.

#### Авторы

Ковшов Станислав Вячеславович, канд. техн. наук  
Санкт-Петербургский Горный университет  
E-mail: kovshovsv@spmi.ru

Гридина Елена Борисовна, канд. техн. наук  
Санкт-Петербургский Горный университет  
E-mail: gridina1@yandex.ru

Иванов Владимир Викторович, канд. техн. наук  
Санкт-Петербургский Горный университет  
E-mail: vladimirivanov@inbox.ru

#### Authors

Stanislav Vyacheslavovich Kovshov, PhD in Engineering  
St. Petersburg Mining University  
E-mail: kovshovsv@spmi.ru

Gridina Elena Borisovna, PhD in Engineering  
St. Petersburg Mining University  
E-mail: gridina1@yandex.ru

Vladimir Viktorovich Ivanov, PhD in Engineering  
St. Petersburg Mining University  
E-mail: vladimirivanov@inbox.ru