

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА РАБОЧЕГО ПЕРСОНАЛА КАРЬЕРА, РАСПОЛОЖЕННОГО В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Е.Б. Гридина¹, Д.О. Боровиков¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Gridina_EB@pers.spmi.ru.

Аннотация: Рассмотрено решение одной из наиболее актуальных проблем в области промышленной безопасности и охраны труда на карьерах Крайнего Севера, осуществляющих разработку месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях — проблеме нарушения воздухообмена внутрикарьерного пространства. Вследствие характерной для Крайнего Севера климатической ситуации часто возникают значительные температурные инверсии, которые могут быть значительными по времени. Таким образом, естественное проветривание будет затруднено или невозможно, газовые выбросы от массовых взрывов и работы двигателей внутреннего сгорания не могут эффективно разветаться, что приводит к необходимости в значительных простоях и экономическим потерям для предприятия. Вместе с тем вследствие недостаточной эффективности проветривания карьерного пространства работники потенциально могут оказаться под влиянием факторов загрязненной атмосферы, что неблагоприятно скажется на состоянии их здоровья. Произведен анализ аэрологических параметров, подтверждающих отклонение состава атмосферного воздуха от санитарных норм при определенных климатических ситуациях, в связи с чем было предложено внедрение комплекса организационно-технических мероприятий по проветриванию карьерного пространства. Данный подход позволит исключить вероятность возникновения простоев карьера, а также обеспечит безопасные условия труда для персонала, что позволит контролировать риск отравлений и развития профессиональных заболеваний у работников предприятия.

Ключевые слова: Крайний Север, карьер, застойные зоны, естественное проветривание, искусственное проветривание, простои, риск отравления, эластичное крыло, охрана труда.

Благодарность: Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 г. № FSRW-2020-0014.

Для цитирования: Гридина Е. Б., Боровиков Д. О. Повышение безопасности труда рабочего персонала карьера, расположенного в сложных горно-геологических условиях Крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 149–163. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_149.

Improving the safety of the working personnel of a quarry located in difficult mining and geological conditions of the Far North

E.B. Gridina¹, D.O. Borovikov¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Gridina_EB@pers.spmi.ru.

Abstract: The article is devoted to solving one of the most urgent problems in the field of industrial safety and labour protection at the quarries of the Far North, which are developing mineral deposits in complex mining and geological conditions: the problem of air-flow disruption of the career space. Due to the typical climatic situation in the Far North, there are often significant temperature variations, which can potentially lead to inversion. Due to these circumstances, natural ventilation will be difficult or impossible, gas emissions from mass explosions and combustion engines cannot be effectively dispelled, which leads to the need for significant downtime and economic losses for the enterprise. However, as a result of insufficient ventilation of the mine, workers can potentially be exposed to air pollution, which will adversely affect their health. In the work, the analysis of aerological parameters confirming deviation of the atmospheric air composition from sanitary standards in certain climatic situations was carried out, in connection with which the implementation of a complex organizational-technical measures to air the career space. This approach will eliminate the probability of career downtime, as well as provide safe working conditions for staff, which will allow to control the risk of poisoning and the development of occupational diseases in employees of the enterprise.

Key words: the Far North, open pit mine, stagnant zone, natural ventilation, controlled ventilation, operational down time, risk of poisoning, elastic wing, labor protection.

Acknowledgements: The research was performed at the expense of the subsidy for the state assignment in the field of scientific activity for 2021 No. FSRW-2020-0014.

For citation: Gridina E. B., Borovikov D. O. Improving the safety of the working personnel of a quarry located in difficult mining and geological conditions of the Far North. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9-1):149-163. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_149.

Введение

Открытый способ разработки месторождений является преобладающим при добыче твердых полезных ископаемых благодаря высокой производительности производств и оборудования, большей, по сравнению с подземным способом, безопасности и не такой высокой себестоимости получаемого конечного продукта [1, 2].

Тенденция к развитию открытых горных работ, как в России, так и в зарубежных странах, приводит к постоянному увеличению глубины карьеров, особенно при добыче высокоценных минералов и руд, таких как алмазы, золото и т.д. Нарастивание глубины, в свою очередь, сопровождается увеличением расстояния транспортирования горной массы на поверхность, усложнением

вскрытия глубоких горизонтов, возникновением оползневых явлений и ухудшением условий естественного проветривания рабочей зоны [3, 4].

Последняя из указанных проблем связана с тем, что с увеличением глубины карьера снижается скорость воздуха, поступающего в карьерное пространство, и почти всегда возникает зона рециркуляции [5, 6]. Из-за особенностей климатических условий Крайнего Севера часто возникают большие температурные инверсии, которые могут быть значительными по времени [7, 8]. С определенных глубин и формы карьерного поля естественная схема проветривания становится неэффективной и требует специальных подходов для ускорения движения воздушных масс или подсвещения рабочего пространства [9].

Загрязнение атмосферы в карьерах, например, оксидами азота может неблагоприятно влиять на состояние здоровья работников [10], вызывая профессионально обусловленные заболевания [11], связанные с нарушениями функций легких и бронхов, а присутствие в атмосфере формальдегида повышает риск развития у работников онкологических заболеваний [12–14].

Поэтому в настоящее время одной из главных задач в подобных условиях является обеспечение оптимального состояния атмосферы в карьерном пространстве, отвечающего требованиям санитарных норм и правил и гарантирующего безопасную и высокопроизводительную работу предприятия [15–18].

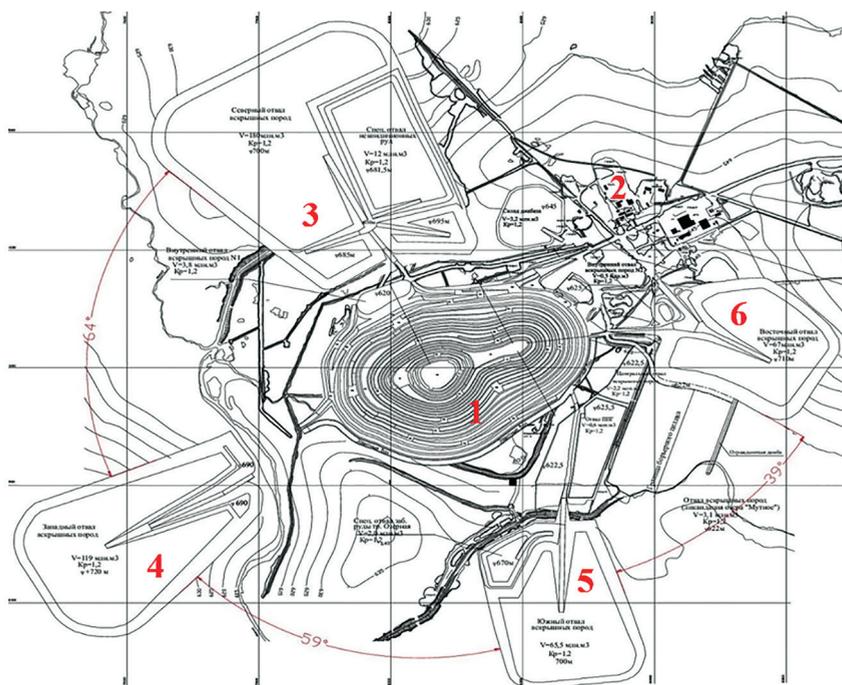
Методы

Этап теоретического исследования решения проблемы особенно важен при

рассмотрении вопроса улучшения воздухообмена внутри карьерного пространства, поскольку позволяет обосновать предлагаемое решение.

Общеизвестно, что проветривание карьеров в настоящее время можно осуществлять двумя способами: естественным и искусственным, а также их комбинацией. Однако естественное проветривание не всегда бывает эффективно, особенно при наличии в глубоких карьерах инверсий и штилей. В таких случаях дополнительно применяются способы искусственного проветривания и увеличения интенсивности естественного воздухообмена [19, 20].

Одним из достаточно эффективных способов увеличения скорости поверхностного воздушного потока является создание специальных проранов-воздухозаборников (рис. 1). Благодаря расположению отвалов по определенной схеме



1 – вид карьера сверху; 2 – промплощадка; 3, 4, 5, 6 – отвалы (прораны-воздухозаборники)

Рис. 1. Рациональное расположение отвалов на карьере

Fig. 1. Rational arrangement of dumps at the open pit mine

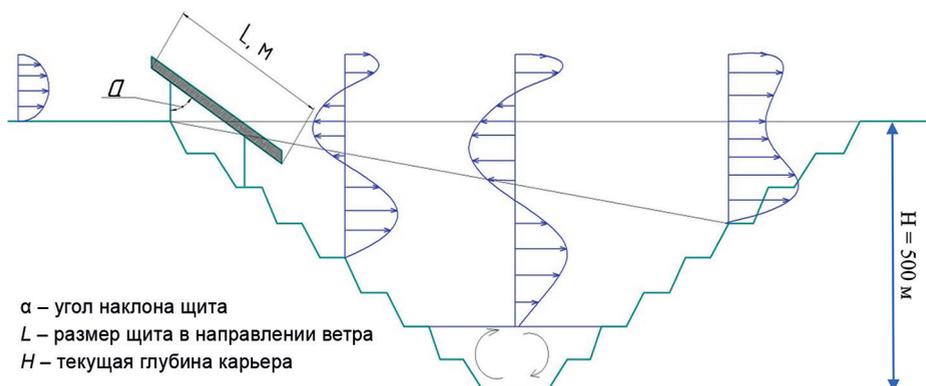


Рис. 2. Расположение эластичного крыла на борту карьера

Fig. 2. Position of the elastic wing on board the open pit mine

за пределами карьера происходит сужение потока и соответствующее возрастание скорости ветра.

При создании проранов следует учитывать преобладающее направление ветра, размеры отвалов, их взаимное расположение и параметр относительной глубины карьера [21]. Увеличение скорости ветра при наличии проранов достигает 20–35% (указанное возрастание скорости отмечено Н.З. Битколовым и И.И. Медведевым [22] в глубоких карьерах, в то время как в мелких и средних карьерах приращение относительной скорости ветра за счет использования проранов не наблюдается). Однако при наличии проранов происходит не только увеличение скорости ветра, но и сокращение до 57% общего количества воздуха, поступающего в карьер, за счет возникновения дополнительных препятствий на поверхности. Также наличие проранов не разбивает и не уменьшает размеры рециркуляционной зоны на дне глубокого карьера [22].

Исходя из этого, можно предложить дополнительный способ для поступления в карьер объема воздуха с большей скоростью. Этот способ заключается в установке на борт карьера специальных ветроотклоняющих щитов по типу эластичных крыльев.

Для условий российского карьера, работающего в условиях Крайнего Севера, где текущая глубина составляет более 500 м, эластичное крыло предлагается выполнить из полиэтилена низкого давления размером 50×50 м под углом 45° к горизонтали (рис. 2).

Создание направленного движения воздуха под крылом вдоль борта предусматривает обеспечение активного воздухообмена нижней зоны и частичную ликвидацию зоны рециркуляции в наиболее глубокой части карьера [23].

Применение эластичного крыла дает наибольший эффект интенсификации естественного воздухообмена [24]. Условия проветривания наиболее глубокой части карьера при использовании эластичного крыла существенно улучшаются.

Одним из основных недостатков большого крыла является сложность его установки, поддержания и сохранения при условии обеспечения перекрытия значительной части борта карьера. Вместе с тем достаточно высокая эффективность подобного рода ветроотклоняющих устройств с увеличением скорости ветра в наиболее глубокой рециркуляционной зоне до 65%, как показывают результаты экспериментов, представленные Н.З. Битколовым и И.И. Медведевым

[22], определяет перспективность такого способа активизации воздухообмена в карьере.

Тем не менее, несмотря на все преимущества, наличие эластичного крыла над карьером не приводит к полной ликвидации зоны рециркуляции в глубокой части карьера, поэтому следует рассмотреть возможность применения дополнительно искусственной вентиляции [25].

Для эффективного проветривания важно правильно выбрать местоположение вентиляционных установок, определить их число и подачу.

На карьерах для искусственной вентиляции рекомендуется использовать установки серии УМП (рис. 3), которые создают искусственные струи, способные при небольших мощностях установок приводить в движение большие массы воздуха [3, 26, 27]. Создаются эти свободные струи за счет рабочего инструмента — винта.

Подобное сочетание подходов позволит сократить продолжительность простоев карьера и предотвратит скопление вредных газов и пыли в карьерном пространстве (в промежутках между снятием показаний по концентрациям), что тоже весьма важно, так как от работающей техники в карьерном пространстве скапливается значительное количество вредных газов, способных пагубно сказаться на здоровье сотрудников [28 — 30].

Данный аспект связан с тем, что индикация газов для их контроля от двигателей внутреннего сгорания (ДВС), например, производится ежемесячно лицом технического надзора [Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 505 Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (Зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 21.12.2020, регистрационный № 61651)], за оставшиеся часы после измерений концентрация газов потенциально может превысить предельно допустимую концентрацию (ПДК) и стать потенциально вредным фактором даже для периодически входящих в рабочую зону сотрудников (горные мастера, инженерный состав отделов промышленной безопасности и охраны труда и пр.). Выявление же превышений ПДК приводит к приостановке работ (данные периоды в районах Крайнего Севера могут достигать 3 — 4 месяцев в год) и негативно сказывается на финансовых результатах предприятия.

К аналогичным выводам приходит, например, Ю.В. Гуль, в исследованиях которого доказана проблематика накопленных пыле-газового облака в карьерном пространстве с концентрацией на-



Рис. 3. Установка местного проветривания

Fig. 3. Local ventilation installation

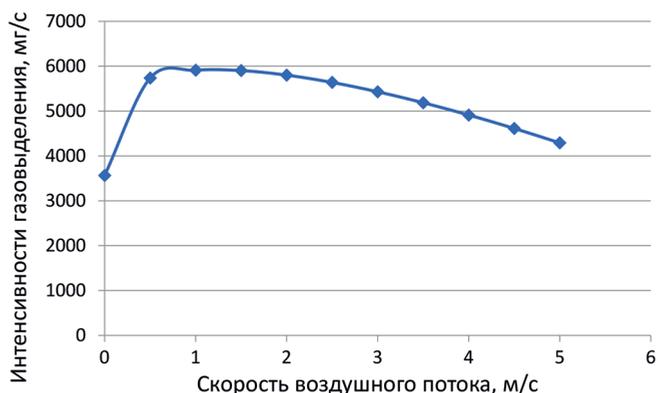


Рис. 4. Зависимость средней интенсивности газовыделения из взорванного блока от скорости воздушного потока

Fig. 4. Dependence of the average intensity of gas release from the exploded block on the air flow rate

столько высокой, что вызывает необходимость прекращения производственного процесса и значительных затрат на нормализацию чистоты атмосферы [31]. Следует также отметить, что в определенных горно-геологических условиях более экономически целесообразными среди методов интенсификации естественного воздухообмена может стать метод аэродинамического профилирования, который позволит обеспечить безотрывное движение ветрового потока вдоль профиля [32]. Данный метод позволит прирастить скорость ветровых потоков, но не снизит зону рециркуляции [22].

Таким образом, в большинстве случаев возникает необходимость приостановки работ либо комбинирования методов интенсификации естественного воздухообмена с искусственной вентиляцией или другими средствами [Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 505 Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (Зарегистрировано в Министерстве юстиции РФ 21.12.2020 г., регистрационный № 61651)].

Результаты

Произведем расчет аэрологических параметров [22, 33] с целью определения необходимого количества установок искусственной вентиляции типа УМП (исходные данные взяты из реальной практики разработки полезного ископаемого в условиях Крайнего Севера в осложненных горно-геологических условиях).

В качестве одного из исходных данных использована расчетная зависимость средней интенсивности газовыделения из взорванного блока от скорости воздушного потока, обдувающего блок (рис. 4).

Из анализа рис. 4 следует, что наилучшее удаление вредностей из взорванной горной массы будет происходить при обдувании взорванных блоков при скорости воздушного потока, находящейся в интервале 0,5...2 м/с. При большей скорости воздушного потока будет происходить взметывание мелкодисперсных фракций пыли [34].

Интенсивность газовыделения из взорванной горной массы соизмерима с интенсивностью выделения вредных газов от работающей транспортной техники, что приведет к стойкому превышению ПДК загрязняющих веществ в рабочих зонах карьера [35].

Время проветривания взорванных блоков в реальной практике работы предприятия превышает 3 ч; исходя из данного обстоятельства, можно дополнительно сделать вывод о настоятельной необходимости в использовании искусственного проветривания, поскольку приостановка работы карьера будет приводить к значительным финансовым убыткам.

Необходимое количество вентиляционных установок (ВУ) определяется исходя из интенсивности выделения вредных веществ работающей техникой, необходимого расхода воздуха для разбавления их до безопасных концентраций и технической производительности самих ВУ.

Итак, необходимый расход воздуха для разбавления вредных веществ в экскаваторном забое:

по пыли

$$Q_n = G_n / (c_{ПДК_n} - c_{ф_n}) / k_m, \quad (1)$$

по газу

$$Q_z = G_z / (c_{ПДК_z} - c_{ф_z}) / k_m, \quad (2)$$

где $c_{ПДК_n}$ и $c_{ф_n}$ — соответственно предельно допустимая концентрация пыли и концентрация пыли в пылевом факеле, мг/м³; $c_{ПДК_z}$ и $c_{ф_z}$ — то же для газа; k_m — коэффициент турбулентной диффузии.

Расход воздуха, подаваемого ВУ в экскаваторный забой:

$$Q_{ВУ} = 4,36 Q_0 (aZ/D_0 + 0,145), \quad (3)$$

где Q_0 — расход воздуха в начальном сечении струи, м³/с; a — коэффициент турбулентной структуры струи; D_0 — диаметр вентилятора, м; Z — расстояние от вентилятора до проветриваемого участка, м.

Количество участков рабочей зоны, нуждающихся в искусственном проветривании:

$$n_y = k_{np} n_s \eta_s / 100, \quad (4)$$

где k_{np} — доля рабочей зоны, нуждающейся в искусственном проветривании, %; n_s — количество экскаваторов, рабо-

тающих в карьере; η_s — коэффициент полезного использования экскаваторов.

Количество ВУ, обеспечивающих разбавление вредностей:

$$n_{ВУ} = Q n_y k_{mz} / Q_{ВУ}, \quad (5)$$

где $Q = \max(Q_n, Q_z)$; k_{mz} — коэффициент технической готовности ВУ.

В формулах (4) и (5) величины n_y и $n_{ВУ}$ округляются до ближайшего целого значения.

В качестве установки для местного проветривания выберем ВУ УМП-1Б. Оросительно-вентиляционная установка УМП-1Б находится в серийном производстве, вследствие этого она может быть рекомендована для использования.

Расстояние от ВУ до проветриваемого участка предположим равным дальностью свободной струи ВУ, т.е. $Z = 400$ м. Остальные параметры ВУ будут следующими:

$$k_{mz} = 1,2; k_m = 0,2; k_{np} = 40\%;$$

$$Q_0 = 240 \text{ м}^3/\text{с}; D_0 = 3,6 \text{ м}; a = 0,09;$$

$$\alpha = 14^\circ; \beta = 10^\circ.$$

Примем коэффициент полезного использования экскаваторов $\eta_s = 0,7$; концентрацию вредных веществ в воздухе, подаваемом для проветривания забоя:

$$\text{по пыли } c_{ф_n} = 0,25 \text{ мг/м}^3;$$

$$\text{по газу } c_{ф_z} = 2,6 \text{ мг/м}^3.$$

ПДК вредных веществ:

$$\text{по пыли } c_{ПДК_n} = 4 \text{ мг/м}^3;$$

$$\text{по газу } c_{ПДК_z} = 20 \text{ мг/м}^3.$$

Необходимый расход воздуха для разбавления вредных веществ в экскаваторном забое:

по пыли

$$Q_n = 711,1 / (4 - 0,25) / 0,2 = 948 \text{ м}^3/\text{с};$$

по газу

$$Q_z = 2100,5 / (20 - 2,6) / 0,2 = 604 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расход воздуха, подаваемого ВУ в экскаваторный забой:

$$Q_{ВУ} = 4,36 \cdot 240 \cdot (0,09 \cdot 400 / 3,6 + 0,145) = 10,6 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Количество участков рабочей зоны, нуждающихся в искусственном проветривании:

$$n_y = k_{np} n_z \eta_z / 100 = 40 \cdot 5 \cdot 0,7 / 100 = 1,4.$$

Принимаем $n_y = 1$ для 1...5 экскаваторных забоев; $n_y = 2$ для 6...9 забоев; $n_y = 3$ для 10...12 забоев и т.д.

Количество ВУ, обеспечивающих разбавление вредностей:

$$n_{BY} = Q_n n_y k_{mz} / Q_{BY} = 948 \cdot 2 \cdot 1,2 / 10,6 \cdot 10^3 = 0,2;$$

$$Q = \max(948, 604) = 948 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Принимаем $n_{BY} = 1$. Заметим, что одна ВУ может обеспечить проветривание до 20 экскаваторных забоев в повторно-кратковременном режиме при условии максимальной дальности струи.

Далее представлен расчет для взорванных блоков. На данном карьере одновременно взрывается три блока.

Средняя скорость ветра на поверхности взорванного блока (м/с):

$$\bar{v}_{6л} = 1/4 \left[0,852(\alpha/15)^{-0,23} + 1,166(\alpha/15)^{-0,41} + 2 \right] \bar{v}_k \quad (6)$$

где α — угол развала горной массы взорванного блока, град.; \bar{v}_k — средняя скорость ветра в карьере, м/с. При $\alpha = 15^\circ$, $\bar{v}_{6л} = \bar{v}_k$.

Средняя скорость воздушного потока в струе, создаваемой ВУ:

$$\bar{v}_{ey} = \frac{0,095\sqrt{\beta}\bar{v}_0}{aL_{6л}/D_0 + 0,145}, \quad (7)$$

где $L_{6л}$ — расстояние от ротора вентиляционной установки до конца проветриваемого участка, м.

Средняя скорость воздушного потока, обдувающего взорванный блок:

$$\bar{v}_\Sigma = \bar{v}_{6л} + \bar{v}_{ey}. \quad (8)$$

Расход воздуха, необходимый для проветривания взорванного блока:

$$Q = \bar{G}_{6л} / (c_{ПДКz} - c_{фz}) / k_m. \quad (9)$$

Расход воздуха, подаваемый ВУ в проветриваемый участок:

$$Q_{BY} = 4,36Q_0 a / D_0 (L_{6л} - L_p), \quad (10)$$

где L_p — расстояние от ВУ до развала горной массы, м.

Количество ВУ для проветривания взорванных блоков по фактору «расхода воздуха»:

$$N_p = Q / Q_{BY} N_{6л}, \quad (11)$$

где $N_{6л}$ — количество взорванных блоков.

То же по фактору «дальности струи»:

$$N_d = 1,25l_{6л} / L_d N_{6л}, \quad (12)$$

где $l_{6л}$ — длина блока, м.

Необходимое количество ВУ выбирается из условия $N = \max(N_p, N_d)$.

Согласно формуле (9) и рис. 4 максимальный расход воздуха, необходимого для проветривания взорванного блока, соответствует скорости воздушного потока $\bar{v}_\Sigma = 1$ м/с ($\bar{G}_{6л} = 5910$ мг/с).

Время проветривания взорванного блока:

$$t_{6л} = 2,09 \cdot 10^3 n_y \cdot \left[k_{BB} / (4\bar{v}_\Sigma - 0,02A + 15) / c_{ПДКz} \right]^{0,4} \cdot \dots \cdot \exp(-0,07h_{cm} k_{mp}^{-0,2}) \quad (13)$$

где k_{BB} — коэффициент, учитывающий тип ВВ; A — масса ВВ, т; $c_{ПДКz}$ — ПДК продуктов детонации ВВ, %; h_{cm} — высота столба воды в скважинах блока, м; k_{mp} — коэффициент, учитывающий содержание тротила в ВВ; n_y — коэффициент условий взрыва (для уступа $n_y = 1$, для траншеи $n_y = 1,4$).

Характеристики заряда ВВ в блоке: используется граммнит 79/21; $k_{BB} = 0,89$; $k_{mp} = 0,2$; удельный расход ВВ — 1,5 кг/м³, следовательно, $A = 337,5$ т.

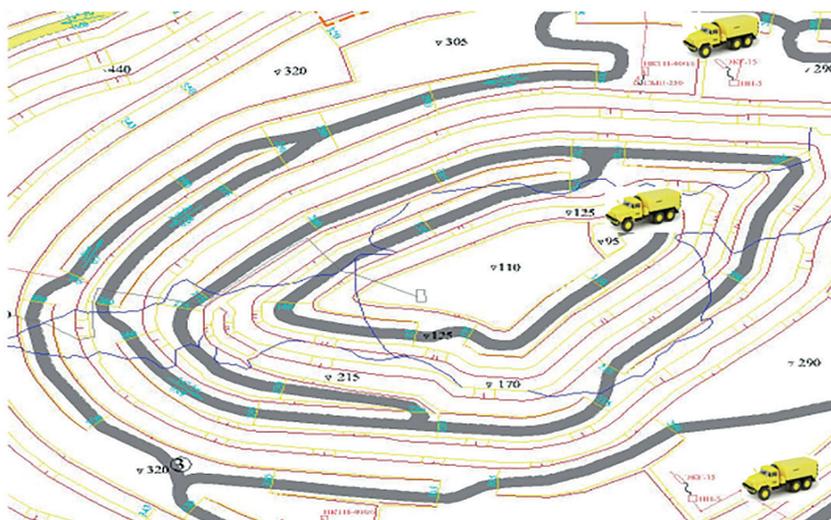


Рис. 5. Расположение установок УМП-1Б на плане горных работ карьера
 Fig. 5. Location of UMP-1B installations on the mining plan

$$t_{bl} = 2,09 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot [0,89 / (4 \cdot 1 - 0,02 \cdot 337,5 + 15) / 0,0017]^{0,4} \dots$$

$$\dots \exp(0) = 9,8 \cdot 10^3 \text{ с или } 2,7 \text{ ч.}$$

В случае отсутствия ветра вблизи взорванных блоков ($\bar{v}_k = 0$) из формулы (7) получим значение расстояния от ротора ВУ до конца проветриваемого участка:

$$L_{bl} = \frac{(0,095 \sqrt{\beta \bar{v}_0} - 0,145 \bar{v}_\Sigma) D_0}{\alpha \bar{v}_\Sigma} =$$

$$= \frac{(0,095 \cdot \sqrt{1,55 \cdot 24} - 0,145 \cdot 1) \cdot 3,6}{0,09 \cdot 1} = 107,3 \text{ м}$$

Расстояние от ВУ до развала горной массы: $L_p = 41 \text{ м}$.

Расход воздуха, необходимый для проветривания взорванного блока:

$$Q = 5910 / (20 - 2,6) / 0,2 = 1698 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Расход воздуха, подаваемый ВУ в проветриваемый участок:

$$Q_{BY} = 4,36 \cdot 240 \cdot 0,09 /$$

$$/ 3,6 \cdot (107 - 41) = 1727 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Количество ВУ для проветривания взорванных блоков по фактору «расхода воздуха»:

$$N_p = 1698 / 1727 \cdot 3 = 2,94;$$

принимаем $N_p = 3$.

То же по фактору «дальнобойности струи»:

$$N_d = (1,25 \cdot 250) / 400 \cdot 3 = 2,3;$$

принимаем $N_d = 3$.

Таким образом, для конкретных условий данного карьера принимаем три установки УМП-1Б, которые обеспечат проветривание взорванных блоков в повторно-кратковременном режиме работы.

Далее представлена схема расположения установок УМП-1Б на плане горных работ (рис. 5).

По опыту применения подобных установок в короткий промежуток времени они должны располагаться на рабочей площадке взорванного блока с наклоном винта около 10° от вертикали для эффективного проветривания.

Сочетание всех трех технических подходов: проранов-воздухозаборников, эластичного крыла, предназначенных для

увеличения скорости ветра и являющихся методами интенсификации естественного воздухообмена, а также установок местного проветривания, разбавляющих и частично удаляющих вредные примеси на участках с интенсивными выделениями, позволит бороться со скоплениями вредных газов от массовых взрывов и работы техники, значительно сократить время простоев карьера, обеспечить бесперебойную и безопасную работу сотрудников, а значит, положительно скажется на финансовом аспекте работы горной компании.

Обсуждение результатов

В статье были предложены мероприятия по улучшению воздухообмена внутри карьерного пространства. Их сущность заключалась в сочетании технических подходов (проранов-воздухозаборников, эластичного крыла, а также установок местного проветривания), поскольку использование их по отдельности не сможет в достаточной мере эффективно решить проблемы с проветриванием глубокого карьера в районе Крайнего Севера.

В ходе работы была подробно проанализирована проблема, связанная с загазованностью в глубоком карьере в условиях Крайнего Севера, изучены причины продолжительных простоев, проанализированы отечественные и международные источники по данной тематике, а также предложены наиболее подходящие подходы к решению проблемы для конкретных горно-геологических и метеорологических условий карьера. Были произведены аэрологические расчеты и обосновано окончательное количество установок УМП-1Б для эффективного проветривания внутрикарьерного пространства.

Экономическая целесообразность использования комплекса мероприятий очевидна, поскольку позволяет решить

проблему простоев карьера, которые в подобных условиях могут составлять более 90 рабочих смен в год, а также положительно скажется на состоянии здоровья сотрудников в долгосрочной перспективе.

Заключение

Проанализировав международные и отечественные методы решения проблемы загазованности карьерного пространства, для данных горно-геологических и метеорологических условий рекомендованы следующие мероприятия:

- использование проранов-воздухозаборников;
- установка эластичного крыла на борту карьера;
- использование установок УМП для искусственной вентиляции карьера.

Следует отметить, что подобный комплексный подход может быть эффективен при условии правильного расположения проранов-воздухозаборников (с учетом розы ветров) и эластичного крыла, а работа установок местного проветривания должна быть логически увязана с местами проведения массовых взрывов и положением рабочих забоев. Это весьма важно в настоящее время, поскольку российские карьеры становятся все более глубокими и опасными, горно-геологические условия отработки постоянно усложняются, что практически повсеместно вызывает нарушение воздухообмена внутри карьерного пространства. При этом практически единственным подходом, который реализуется, является приостановка работ при концентрациях загрязняющих веществ выше предельно допустимых.

Такое решение проблемы нельзя считать правильным, так как оно вызывает значительные финансовые убытки, может быть потенциально опасно для сотрудников и требует своевременного и технически грамотного пересмотра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Longjun Dong, Xiaojie Tong, Xibing Li, Jian Zhou, Shaofeng Wang, Bing Liu Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines // *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 210, pp. 1562–1578. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.291.

2. Шишков Р. И., Федорин В. А. Обоснование вскрытия и подготовки модульного шахтоучастка при комбинированном способе добычи угля в Кузбассе на примере ШУ «Байкаимская» // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 243. – С. 293–298. DOI: 10.31897/рmi.2020.3.293.

3. Шахрай С. Г., Курчин Г. С., Сорокин А. Г. Новые технические решения по проветриванию глубоких карьеров // *Записки Горного института*. – 2019. – Т. 240. – С. 654–659. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.654.

4. Василец В. Н., Афанасьев П. И., Павлович А. А. Обеспечение условий безопасной эксплуатации горнотранспортного комплекса при воздействии сейсмозрывных волн // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 1. – С. 26–35. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-26-35.

5. Choudhury A., Bandopadhyay S. The effect of velocity on the dispersion of pollutants in a hypothetical arctic open-pit mine / *Proceedings of the 24th International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution (AIR 2016)*. 2016, vol. 207, pp. 35–45. DOI: 10.2495/AIR160041.

6. Cichowicz R., Wielgosiński G., Fetter W. Effect of wind speed on the level of particulate matter PM10 concentration in atmospheric air during winter season in vicinity of large combustion plant // *Journal of Atmospheric Chemistry*. 2020, vol. 77, pp. 35–48. DOI: 10.1007/s10874-020-09401-w.

7. Tukkaraja P., Keerthipati M., French A. Simulating temperature inversions in surface mines using computational fluid dynamics / *Proceedings of the South Dakota Academy of Science*. 2016, vol. 95, pp. 119–124.

8. Зорин А. В. Энергетическая оценка интенсификации естественного воздухообмена в карьерах // *Горный журнал*. – 2010. – № 11. – С. 85–87.

9. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка влияния температурных условий на естественную вентиляцию глубоких карьеров Арктической зоны // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2022. – № 2. – Т. 14. – С. 218–228. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.

10. Rudakov M., Babkin R., Medova E. Improvement of working conditions of mining workers by reducing nitrogen oxide emissions during blasting operations // *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 21, article 9969. DOI: 10.3390/app11219969.

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

12. Luo H., Zhou W., Jiskani I. M., Wang Z. Analyzing characteristics of particulate matter pollution in open-pit coal mines: Implications for green mining // *Energies*. 2021, vol. 14, no. 9, article 2680. DOI: 10.3390/en14092680.

13. Hendryx M., Islam M. S., Dong G. H., Paul G. Air pollution emissions 2008–2018 from Australian coal mining: Implications for public and occupational health // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020, vol. 17, article 1570. DOI: 10.3390/ijerph17051570.

14. Li N., Maesano C. N., Friedrich R., Medda E., Brandstetter S., Kabesch M., Apfelbacher C., Melter M., Seelbach-Göbel B., Annesi-Maesano I., Sarigiannis D. A model for estimating the lifelong exposure to PM2.5 and NO₂ and the application to population studies // *Environmental Research*. 2019, vol. 178, no. 6, article 108629. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108629.

15. Alvarado M., Gonzalez F. M., Fletcher A., Doshi A. A. Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites // *Sensors*. 2015, vol. 15, no. 8, pp. 19667 – 19687. DOI: 10.3390/s150819667.

16. Abdollahisharif J., Bakhtavar E., Nourizadeh H. Green biocompatible approach to reduce the toxic gases and dust caused by the blasting in surface mining // *Environmental Earth Sciences*. 2016, vol. 75, no. 191. DOI: 10.1007/s12665-015-4947-9.

17. Kahraman M. M., Erkayaoglu M. A data-driven approach to control fugitive dust in mine operations // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021, vol. 38, pp. 549 – 558. DOI: 10.1007/s42461-020-00318-2.

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

19. Тимофеева Ю. В., Суксова С. А., Долган А. А., Попов Е. В. Способы проветривания карьеров // *Вестник Евразийской науки*. – 2020. – № 6. – Т. 12. – С. 58 – 65.

20. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка эффективности естественного проветривания карьеров при отработке золоторудных месторождений на основе математического моделирования аэродинамических процессов // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2020. – № 4. – С. 441 – 451.

21. Kia S., Flesch T. K., Freeman B. S., Aliabadi A. A. Atmospheric transport over open-pit mines: The effects of thermal stability and mine depth // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021, vol. 214, pp. 1 – 22. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104677.

22. Битколов Н. З., Медведев И. И. Аэрология карьеров. – М.: Недра, 1992. – 264 с.

23. Yastrebova K. N., Moldovan D. V., Chernobay V. I. Solving the issue of ventilating atmosphere of opencast mining by resloping bench face // *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020, vol. 29, no. 1, pp. 1 – 6.

24. Ковлеков И. И. Интенсификация проветривания глубоких алмазных карьеров смерчеобразными вихрями // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 5-2. – С. 124 – 135. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_124.

25. Драгунский О. Н. О разрушении внутрикарьерных инверсий средствами искусственной вентиляции // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 5. – С. 13 – 21. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-13-21.

26. Чемезов Е. Н., Делец Е. Г. Борьба с пылью на открытых горных работах // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. – 2017. – № 1. – С. 42 – 46.

27. Wang Z.-M., Zhou W., Jiskani I. M., Ding X.-H., Liu Z.-C., Qiao Y.-Z., Luan B. Dust reduction method based on water infusion blasting in open-pit mines. A step toward green mining // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2021, pp. 1 – 15. DOI: 10.1080/15567036.2021.1903118.

28. Подображин С. Н. Исследование составов для предотвращения пыления открытых поверхностей при добыче угля // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. – 2022. – № 1. – С. 67 – 73.

29. Мешков А. А., Коршунов Г. И., Кондрашева Н. К., Еремеева А. М., Серегин А. С. Способ снижения загрязненности воздуха рабочих зон угольных шахт вредными выбросами дизелевозов // *Безопасность труда в промышленности*. – 2020. – № 1. – С. 68 – 72. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-68-72.

30. Кондрашева Н. К., Киреева Е. В., Зырянова О. В. Разработка новых составов для борьбы с пылеобразованием в горнодобывающей и горнотранспортной промышленности // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 248. – С. 272 – 280. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.11.

31. Гуль Ю. В. Проблема оптимальности при управлении воздухообменом в карьерах // *Записки Горного института*. – 1972. – Т. 63. – № 1.

32. Рогалев В. А. Нормализация атмосферы горнорудных предприятий. — М.: Недра, 1993. — 240 с.
33. Старостин И. И. Расчет рециркуляционной схемы естественного проветривания карьеров // Безопасность в техносфере. — 2015. — Т. 4. — № 3. — С. 22–27. DOI: 10.12737/11877.
34. Ковшов С. В., Пасынков А. В. Оценка выбросов пыли при транспортировании горной массы на месторождениях, разрабатываемых открытым способом // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 1. — С. 78–87.
35. Копытов А. И., Масаев Ю. А., Масаев В. Ю. Влияние технологии взрывных работ на состояние окружающей среды в Кузбассе // Уголь. — 2020. — № 5 (1130). — С. 57–62. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-5-57-62. **МИАБ**

REFERENCES

1. Longjun Dong, Xiaojie Tong, Xibing Li, Jian Zhou, Shaofeng Wang, Bing Liu Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 210, pp. 1562–1578. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.291.
2. Shishkov R. I., Fedorin V. A. Justification of stripping and development of a modular mine site for a combined coal mining method in Kuzbass on the example Baikaimskaya mine site. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 243, pp. 293–298. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.3.293.
3. Shakhrai S. G., Kurchin G. S., Sorokin A. G. New technical solutions for ventilation in deep quarries. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 240. С. 654–659. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.654.
4. Vasilets V. V., Afanasev P. I., Pavlovich A. A. Safe operation of mining-and-transport system under impact of seismic shot waves. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 1, pp. 26–35. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-26-35.
5. Choudhury A., Bandopadhyay S. The effect of velocity on the dispersion of pollutants in a hypothetical arctic open-pit mine. *Proceedings of the 24th International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution (AIR 2016)*. 2016, vol. 207, pp. 35–45. DOI: 10.2495/AIR160041.
6. Cichowicz R., Wielgosiński G., Fetter W. Effect of wind speed on the level of particulate matter PM10 concentration in atmospheric air during winter season in vicinity of large combustion plant. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 2020, vol. 77, pp. 35–48. DOI: 10.1007/s10874-020-09401-w.
7. Tukkaraja P., Keerthipati M., French A. Simulating temperature inversions in surface mines using computational fluid dynamics. *Proceedings of the South Dakota Academy of Science*. 2016, vol. 95, pp. 119–124.
8. Zorin A. V. Energy assessment of the intensification of natural air exchange in quarries. *Gornyi Zhurnal*. 2010, no. 11, pp. 85–87. [In Russ].
9. Gendler S. G., Borisovsky I. A. Assessment of the influence of temperature conditions on the natural ventilation of deep pits in the Arctic zone. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, no. 2, vol. 14, pp. 218–228. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.
10. Rudakov M., Babkin R., Medova E. Improvement of working conditions of mining workers by reducing nitrogen oxide emissions during blasting operations. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 21, article 9969. DOI: 10.3390/app11219969.
11. Gendler S. G., Prokhorova E. A. Assessment of the cumulative impact of occupational injuries and diseases on the state of labor protection in the coal industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10-2, pp. 105–116. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_105.

12. Luo H., Zhou W., Jiskani I. M., Wang Z. Analyzing characteristics of particulate matter pollution in open-pit coal mines: Implications for green mining. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 9, article 2680. DOI: 10.3390/en14092680.
13. Hendryx M., Islam M. S., Dong G. H., Paul G. Air pollution emissions 2008 – 2018 from Australian coal mining: Implications for public and occupational health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020, vol. 17, article 1570. DOI: 10.3390/ijerph17051570.
14. Li N., Maesano C. N., Friedrich R., Medda E., Brandstetter S., Kabesch M., Apfelbacher C., Melter M., Seelbach-Göbel B., Annesi-Maesano I., Sarigiannis D. A model for estimating the lifelong exposure to PM_{2.5} and NO₂ and the application to population studies. *Environmental Research*. 2019, vol. 178, no. 6, article 108629. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108629.
15. Alvarado M., Gonzalez F. M., Fletcher A., Doshi A. A. Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites. *Sensors*. 2015, vol. 15, no. 8, pp. 19667 – 19687. DOI: 10.3390/s150819667.
16. Abdollahisharif J., Bakhtavar E., Nourizadeh H. Green biocompatible approach to reduce the toxic gases and dust caused by the blasting in surface mining. *Environmental Earth Sciences*. 2016, vol. 75, no. 191. DOI: 10.1007/s12665-015-4947-9.
17. Kahraman M. M., Erkayaoglu M. A data-driven approach to control fugitive dust in mine operations. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021, vol. 38, pp. 549 – 558. DOI: 10.1007/s42461-020-00318-2.
18. 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.
19. Timofeeva Yu. V., Suksova S. A., Dolkan A. A., Popov E. V. Methods of airing quarries. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020, no. 6, vol. 12, pp. 58 – 65. [In Russ].
20. Gendler S. G., Borisovsky I. A. Evaluation of the effectiveness of natural ventilation of quarries during mining of gold deposits based on mathematical modeling of aerodynamic processes. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 4, pp. 441 – 451. [In Russ].
21. Kia S., Flesch T. K., Freeman B. S., Aliabadi A. A. Atmospheric transport over open-pit mines: The effects of thermal stability and mine depth. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021, vol. 214, pp. 1 – 22. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104677.
22. Bitkolov N. Z., Medvedev I. I. *Aerologiya kar'erov* [Aerology of quarries], Moscow, Nedra, 1992, 264 p.
23. Yastrebova K. N., Moldovan D. V., Chernobay V. I. Solving the issue of ventilating atmosphere of opencast mining by resloping bench face. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020, vol. 29, no. 1, pp. 1 – 6.
24. Kovlekov I. I. Intensification of airing of deep open-pit diamond mine by tornado-like vortices. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 124 – 135. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_124.
25. Dragunskiy O. N. Breaking inversions in open pit mines using induced ventilation facilities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 13 – 21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-13-21.
26. Chemezov E. N., Delec E. G. Struggle with dust on open mountain works. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2017, no. 1, pp. 42 – 46. [In Russ].
27. Wang Z.-M., Zhou W., Jiskani I. M., Ding X.-H., Liu Z.-C., Qiao Y.-Z., Luan B. Dust reduction method based on water infusion blasting in open-pit mines. A step toward green mining. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2021, pp. 1 – 15. DOI: 10.1080/15567036.2021.1903118.
28. Podobrazhin S. N. investigation of compositions to prevent dusting of exposed surfaces during coal mining. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2022, no. 1, pp. 67 – 73. [In Russ].

29. Meshkov A. A., Korshunov G. I., Kondrasheva N. K., Eremeeva A. M., Seregin A. S. Method of reducing air pollution of the coal mines working areas with diesel locomotives harmful emissions. *Occupational Safety in Industry*. 2020, no. 1, pp. 68–72. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-68-72.

30. Kondrasheva N. K., Kireeva E. V., Zyryanova O. V. Development of new compositions for dust control in the mining and mineral transportation industry. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 248, pp. 272–280. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.11.

31. Gul Y. V. The problem of optimum air flow management in quarries. *Journal of Mining Institute*. 1972, vol. 63, no. 1. [In Russ].

32. Rogalev V. A. *Normalizatsiya atmosfery gornorudnykh predpriyatiy* [Normalization of the atmosphere of mining enterprises], Moscow, Nedra, 1993, 240 p.

33. Starostin I. I. On the calculation of recirculating scheme of quarry ventilation. *Safety in technosphere*. 2015, vol. 4, no. 3, pp. 22–27. [In Russ]. DOI: 10.12737/11877.

34. Kovshov S. V., Pasyukov A. V. Evaluation of dust emissions during transportation of rock mass at deposits developed open pit mine. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 1, pp. 78–87. [In Russ].

35. Kopytov A. I., Masaev Yu. A., Masaev V. Yu. Impact of blasting technology on the environment in Kuzbass. *Ugol'*. 2020, no. 5 (1130), pp. 57–62. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-5-57-62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гридина Елена Борисовна¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Gridina_EB@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7265-1115,

Боровиков Дмитрий Олегович¹ — аспирант,
e-mail: Borovikov92@bk.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2269-6526,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Гридина Е.Б., e-mail: Gridina_EB@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.B. Gridina¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,

e-mail: Gridina_EB@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7265-1115,

D.O. Borovikov¹, Graduate Student,
e-mail: Borovikov92@bk.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2269-6526,

¹ Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: E.B. Gridina, e-mail: Gridina_EB@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 31.01.2023; получена после рецензии 07.09.2023; принята к печати 10.08.2023.

Received by the editors 31.01.2023; received after the review 07.09.2023; accepted for printing 10.08.2023.

