

Обеспечение аэрологической безопасности рабочего персонала карьеров при массовых взрывах

Гендлер С. Г.¹, Медова Е. А.^{1*}

¹ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: s225057@stud.spmi.ru

Реферат

Цель работы: обосновать необходимость достоверного прогноза места возникновения и геометрии застойной зоны, а также выбор способа принудительной подачи свежего воздуха для ее разрушения с последующим выносом загрязняющих веществ за пределы карьера при обеспечении аэрологической безопасности после осуществления массового взрыва.

Методика проведения исследований. Рассмотрены условия и характеристика застойных зон, образующихся после массовых взрывов, в ходе обзора определена зависимость условий образования пылегазового облака от параметров буровзрывных работ.

Результаты и их анализ. Проведен анализ существующих методик определения показателей застойных зон. Предложен способ вентиляции глубоких карьеров, который позволяет эффективно предотвратить образование в карьерном пространстве зон, в которых концентрация загрязняющих веществ превышает предельно допустимое значение, путем нагнетания воздуха с последующим его разбавлением по трубопроводам в выработках, выходящим на сопряжение откосов и рабочих площадок карьерных уступов.

Выводы и область применения. Результаты могут быть применены для определения дальнейших методов, позволяющих осуществить принцип «вентиляция по требованию», так как отличительной особенностью образования застойных зон в карьерах после массовых взрывов является их временный характер, определяемый превышением предельно допустимых значений концентрации загрязняющих веществ. Продолжительность аэродинамического воздействия на застойные зоны должна быть равна длительности периода их разрушения до достижения нормативных параметров воздуха, носить периодический характер, совпадающий с графиком проведения массовых взрывов.

Ключевые слова: аэрогазодинамические процессы; открытые горные работы; загрязняющие вещества; застойная зона; способы вентиляции.

Введение. Одним из актуальных направлений разработки рудных месторождений в Российской Федерации является переход от подземного к открытому способу добычи, для которого буровзрывной способ рыхления горных пород является приоритетным. Несмотря на очевидные преимущества буровзрывной технологии [1], ее применение обуславливает появление дополнительных вредных факторов, которые влияют на условия труда рабочего персонала и вызывают значительные экономические потери вследствие потерь рабочего времени. Наиболее неблагоприятное воздействие на здоровье горнорабочих оказывают образующиеся в результате взрывных работ окислы азота, представляющие комбинацию оксида и диоксида азота, которые приводят к росту как риска хронических заболеваний, так и появления случаев острого отравления.

В начальный период разработки при глубине карьера до 200 м естественная вентиляция способна эффективно обеспечивать нормализацию рудничной атмосферы, в том числе по окислам азота [2].

Повышение глубины разработки не только приводит к росту обводненности и трещиноватости пород, увеличивающих образование окислов азота при взрывах, но и в случае неблагоприятных метеорологических условий способствует их накоплению в застойных зонах, прилегающих к рабочим уступам карьера, что может привести к превышению предельно допустимых концентраций, установленных ФНИП (*Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 N 507 (ред. от 07.04.2022) Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (Зарегистрировано в Минюсте России 18.12.2020 N 61587)*).

Интенсификация естественной вентиляции может быть осуществлена за счет управления ветровыми и тепловыми потоками. Например, в работе [2] рассматриваются технические решения, основанные на формировании в карьерном пространстве областей с различными плотностями воздуха. Для этого предлагается распылять холодную воду в воздушный поток, поступающий в карьерное пространство с подветренной стороны, а с наветренной стороны – горячую, увеличивая угол раскрытия свободной струи на $3\text{--}6^\circ$ [1].

Принудительная подача воздуха должна способствовать выносу загрязняющих веществ из застойных зон, образующихся при отрицательных или нулевых температурных инверсиях и прилегающих к поверхностям рабочих уступов [3]. Выбор способов искусственной вентиляции осуществляется с учетом всех особенностей карьеров: его глубины и протяженности, наличия и глубины криолитозоны, розы ветров и соотношения между температурами атмосферного воздуха и воздуха в карьере, количества и типа взрываемого вещества, схемы взрывания и инициирования и т. д. [4].

Для принудительной подачи воздуха в застойные зоны могут быть использованы вентиляционные каналы различной конструкции (выработки, воздухопроводы), вентиляционные установки, турбины и т. д. [5].

Таким образом, основными задачами при обеспечении аэрологической безопасности после осуществления массового взрыва следует считать достоверный прогноз места возникновения и геометрии застойной зоны, а также выбор способа принудительной подачи свежего воздуха для ее разрушения с последующим выносом загрязняющих веществ за пределы карьера.

Условия образования застойных зон после массовых взрывов и характеристика загрязнения воздуха в них. Основной причиной образования оксидов азота и пыли после массовых взрывов на карьере является наличие неидеальных реакций окисления во время взрыва, протекание которых усложняется различными факторами: составом взрывчатого вещества и плотностью заряжения, температурой окружающей среды, обводненностью скважины и др. [6, 7]. В статье [8] установлены зависимости выделения ядовитых газов от применяемых типов взрывчатых веществ. Так, анализ экспериментальных данных показал, что во взрывных газах тротилсодержащих взрывчатых веществ общее количество оксидов азота сопоставимо с количеством углекислого газа. Хотя замена одних видов взрывчатых веществ на более водоустойчивые, а также исследования, направленные на определение наиболее оптимальной плотности заряжения скважины, позволяют снизить кислородный баланс до близкого к нулевому [9–12], конкретные метеорологические условия затрудняют проветривание, и тогда естественная вентиляция становится менее эффективной, появляются застойные зоны, в которых концентрация вредных веществ превышает предельно допустимые значения (рис. 1). В этом случае для продолжения работ требуется промежуток времени, превышающий регламентированные 20–30 мин, что приводит к простоям [13].

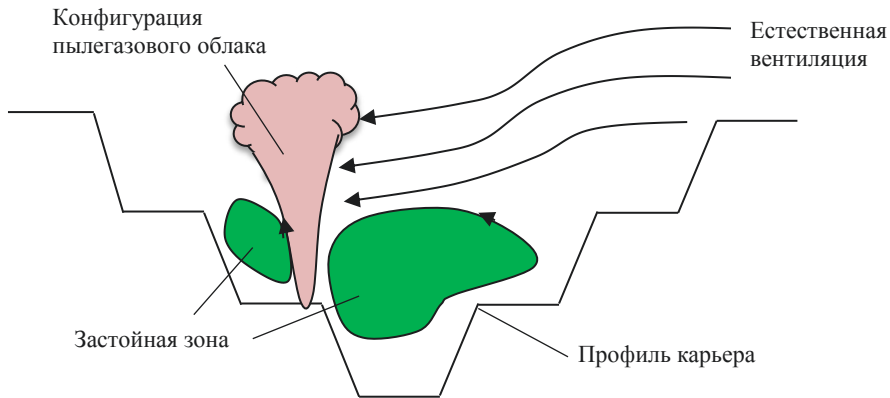


Рисунок 1. Схема образования пылегазового облака и застойных зон
Figure 1. Scheme of formation of dust and gas cloud and air stagnation zones

Распространение пылегазового облака имеет сложный волнообразный характер, так как состав и плотность заряжающего взрывчатого вещества, температура окружающей среды, обводненность скважины и другие факторы влияют на процесс образования пылегазового облака не только в момент взрыва, но и во время его перемещения в карьерном пространстве и возникновения зон рециркуляции, в которых накапливаются загрязняющие вещества. В работе [14] рассматривается рассеивание загрязняющих газов и примесей, при котором волна, соответствующая процессу движения пылегазового облака, описывается радиальным движением, на которое накладывается процесс атмосферной диффузии. Представляется возможным описать зависимость движения и распространения облака загрязняющих веществ двумя основными процессами: диффузией и взаимодействием с атмосферой, т. е. влиянием сил гравитации и движением воздуха [15].

Таким образом, при рассеивании газового облака присутствуют два основных процесса: часть продуктов взрыва рассеивается по трещинам взрываемого блока, а часть выходит из скважины. В работах [16, 17] выход вредных примесей при массовых взрывах разделяется на этапы вытеснения: через трещины и пустоты в породах; при взаимодействии по аэродинамическим связям в процессе проветривания.

Выделяется несколько основных векторов, в направлении которых передвигается облако: по вертикали и по горизонтали под действием сил диффузии. Здесь необходимо упомянуть о влиянии метеорологических факторов и параметров взрывчатого вещества, так как при разных условиях рассеивание по данным направлениям будет различаться [18].

Говоря о процессе диффузии при рассеивании пылегазового облака, следует упомянуть, что этот процесс происходит в несколько этапов. В работе [19] рассматривался процесс рассеивания ядовитых веществ на примере Восточного карьера Фушунь, описан механизм движения пыли в атмосфере в три этапа: стадия движения, стадия появления грибовидного облака и стадия рассеивания при диффузии. На протяжении всего процесса рассеивания существует риск негативного воздействия как на работников карьера, так и на окружающую среду.

Ущерб, причиняемый работникам карьера и окружающей среде, зависит также и от абсорбированных породами газов, степень ущерба зависит от концентрации и характера выделяющихся вредных веществ [20, 21]. Значительное влияние на дис-

перность и количество образующейся пыли оказывает состав и удельный расход взрывчатого вещества, а также обводненность и трещиноватость пород взрывае-мого блока [22]. Дисперсность пыли и размер частиц позволяют оценить их спо-собность переноситься на определенные расстояния, так как частицы размерами меньше 10–20 мкм относят к глобальному уровню (способны распространяться на большие расстояния) либо региональному (оседают в пределах карьера) в зависи-мости от их дисперсности [23].

Пылегазовое облако способно достигать высоты 1,5–1,6 км и распространяться в атмосфере на расстояние от 8 до 12 км [24, 25], количество пыли в зависимости от вида и удельного расхода взрывчатого вещества варьируется в широких преде-лах [26].

Методы определения топологии застойных зон в карьерах и состава возду-ха после массовых взрывов. Одним из наиболее перспективных способов опре-деления параметров пылегазового облака является математическое моделирование аэрогазотермодинамических процессов при образовании и распространении пылега-зового облака, реализуемых на основе программных продуктов Flowvision, ANSYS Fluent и др. [27–37]. В статье [34] был применен метод численного моделирования с учетом местоположения массовых взрывов, начальной концентрации газовой ком-поненты в пылегазовом облаке и скорости набегающего ветрового потока. В другой работе [35], напротив, исследовалось влияние ветровых сил, а перечисленные ранее параметры не учитывались. Стоит отметить, что общим результатом всех иссле-дований является зависимость параметров пылегазового облака, имеющая волно-образных характер. Это говорит о том, что формирование облака загрязняющих веществ происходит в несколько этапов [38].

Также важным аспектом при определении количества загрязняющих веществ является необходимость учитывать фильтрацию взрывных газов через трещины в горном массиве [39].

В работе [40] предлагается использовать комплексную розу ветров при опреде-лении размеров пылегазового облака, так как на точность определения влияет не только скорость ветра, но и его частота (в день, в месяц, в год) и продолжитель-ность. В статье также делается акцент на том, что в большинстве моделей не учиты-ваются такие важные факторы, как влажностные параметры воздуха, атмосферное давление, статическое давление, которое может изменяться при разнице в степени освещенности на бортах, что напрямую влияет на направление рассеивания облака загрязняющих веществ [41].

А. Ю. Ларичев и др. в статье [42] делают обзор методик расчета параметров пы-легазового облака и предлагают производить расчет с учетом влияния таких факто-ров, как удельный расход и другие энергетические характеристики взрывчатых ве-ществ, параметры буровзрывных работ, влияние скорости детонации, а также типы применяемых взрывчатых веществ, крепость горных пород и конструкция заряда. В работе [43] описывается методика, реализованная в программе Dust, в которой учитываются практически все перечисленные параметры, однако предложенный А. Ю. Ларичевым подход заключается во введении аммонитового пылевого эквива-лента и аммонитового газового эквивалента, аналогично энергетическому тротило-вому эквиваленту при проведении массовых взрывов с использованием взрывчато-го вещества аммонит № 6ЖВ.

Существует ряд работ [44, 45], в которых устанавливается зависимость высоты и других параметров облаков загрязняющих веществ и пылевых частиц от метеоро-логических параметров, а также массы зарядов.

Немаловажным представляется отметить применение различных математических моделей для описания высоты подъема и радиуса основания пылегазового облака при массовых взрывах. Среди базовых математических алгоритмов можно выделить модель «коробки», модель Гаусса, модель Эйлера и модель Лагранжа. Эти четыре математические модели являются основными подходами, используемыми для моделирования рассеивания загрязняющих веществ, находящихся в воздухе. Возросшая вычислительная мощность персональных компьютеров привела к созданию огромного количества компьютерных моделей рассеивания загрязняющих веществ, находящихся в воздухе [46, 47].

Программное обеспечение SOVA fluid dynamics [48, 49] способно моделировать сложные процессы с использованием уравнений Эйлера. Модель позволяет точно описать границы между областями с различными физическими и химическими свойствами, содержит полуэмпирические уравнения состояния для продуктов детонации [50–52], таблицы термодинамических свойств воздуха [53].

При использовании программного пакета ANEOS [54] модель учитывает влияние силы тяжести и стратификацию атмосферы, для чего используются либо стандартные таблицы, либо, если таковые имеются, результаты метеорологических измерений.

Таким образом, использование методов математического моделирования в большинстве практически интересных случаев дает возможность с достаточной степенью точности устанавливать топологию образовавшихся после массовых взрывов застойных зон, в которых накапливаются загрязняющие вещества.

Требования к системам вентиляции для минимизации негативного влияния массовых взрывов на качество карьерного воздуха. Отличительной особенностью образования застойных зон в карьерах после массовых взрывов является их временный характер, определяемый превышением предельно допустимых значений загрязняющих веществ. Продолжительность аэродинамического воздействия на застойные зоны должна быть равна длительности периода их разрушения до достижения нормативных параметров воздуха, носить периодический характер, совпадающий с графиком проведения массовых взрывов. Должен реализовываться принцип «вентиляция по требованию».

В конструктивном плане схемы проветривания карьера после массовых взрывов должны обеспечивать возможность оперативного использования вентиляционного

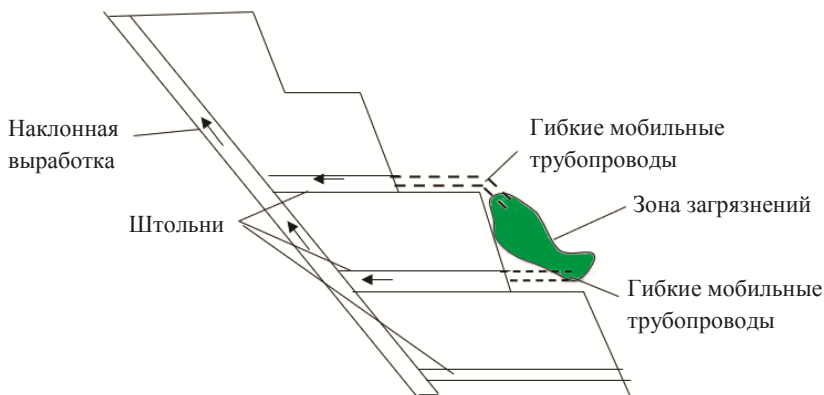


Рисунок 2. Конструктивная реализация принципа «вентиляция по требованию»
Figure 2. Structural implementation of the “requested ventilation” principle

оборудования до момента достижения нормативных параметров воздуха в зонах рециркуляции. Таким вентиляционным оборудованием могут являться трубопроводы и вентиляционные установки [55, 56]. После разрушения застойных зон и выноса загрязняющих веществ за пределы карьера принудительная подача воздуха может быть прекращена.

Одним из путей реализации такого подхода является конструкция, которая представляет собой выдвигаемый из штольни гибкий трубопровод (рис. 2). Для организации принудительной подачи воздуха в периоды, когда вблизи рабочих бортов карьеров образуется зона, в которой концентрация загрязняющих веществ превышает предельно допустимое значение, проветривание карьера осуществляется через наклонную выработку, связанную с рабочими площадками уступов штольнями. В штольне монтируется специальное устройство для перемещения гибкого трубопровода. В месте сопряжения наклонной выработки и штольни устанавливается нагнетающий вентилятор.

Заключение. Влияние состава взрывчатого вещества и плотности заряжания, температуры окружающей среды, обводненности скважины, дисперсности пыли и других факторов определяет волнообразный характер образования и рассеивания пылегазового облака, при этом могут образовываться зоны рециркуляции, в которых накапливаются загрязняющие вещества.

Использование методов математического моделирования в большинстве практически интересных случаев дает возможность с достаточной степенью точности устанавливать топологию застойных зон, образовавшихся после массовых взрывов, в которых накапливаются загрязняющиеся вещества.

Продолжительность аэродинамического воздействия на застойные зоны должна быть равна длительности периода их разрушения до достижения нормативных параметров воздуха, носить периодический характер, совпадающий с графиком проведения массовых взрывов.

После получения достоверных моделей главную сложность представляет выбор дальнейших мероприятий. Использование гибких трубопроводов в качестве одного из способов «вентиляции по требованию» дает возможность организовать проветривание зоны загрязнений вблизи рабочих бортов карьеров при необходимости, в случае превышения предельно допустимых значений загрязняющих веществ в процессе открытой разработки месторождений полезных ископаемых. В результате взаимодействия двух воздушных потоков, вызванных движением воздуха за счет естественных факторов и принудительной вентиляции, объем зоны рециркуляции в карьере сокращается до минимальных значений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kozyrev S. A., Amosov P. V. Ways of normalizing the atmosphere of deep quarries // Bulletin of MGTU. 2014. Vol. 17. No. 2. P. 231–237. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107
2. 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
3. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Управление аэродинамическими процессами при разработке золоторудных месторождений открытым способом // ГИАБ. 2021. № 2. С. 99–107. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107
4. Rudakov M., Babkin R., Medova E. Improvement of working conditions of mining workers by reducing nitrogen oxide emissions during blasting operations // Application Sciences. 2021. Vol. 11. P. 9969. DOI: 10.3390/app11219969
5. Вассерман А. Д., Козырев С. А. Научные основы создания и поддержания безопасного состояния воздушной среды при отработке месторождения полезных ископаемых // Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе. Апатиты, КНЦ РАН, 2005. С. 144–149.

6. Парамонов Г. П., Федосеев А. В., Гапонов Ю. С. Оценка влияния трещиноватости массива на его разрушение при производстве взрывных работ // Записки Горного института. 2013. № 204. 294 с. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5593> [дата обращения: 06.06.2023].
7. Afanasiev P. I., Pasynkov A. V., Kurta I. V. Optimal parameters for drilling explosions when developing coal deposits by open-pit method // Web of Conferences. 2020. No. 164. P. 1–7.
8. Козырев С. А., Власова Е. А. Газовая вредность взрывчатых веществ, применяемых в горнодобывающей промышленности // Горная промышленность. 2021. № 5. С. 106–111. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-106-111
9. Isheyskiy V., Sanchidrián J. A. Prospects of applying MWD technology for quality management of drilling and blasting operations at mining enterprises // Minerals. 2020. No. 10. P. 925. DOI: 10.3390/min10100925
10. Скважинная забойка: пат. 182481 Рос. Федерация. № 2018120782; заявл. 05.06.2018; опубл. 21.08.2018. Бюл. № 24. 6 с.
11. Korshunov G. I., Andreev R. E., Gridina E. B. Calculation of gas-dynamic parameters in powder chamber of a blast hole // International Journal of Civil Engineering & Technology. 2019. No. 2. P. 69–78. URL: https://iaeme.com/Home/article_id/IJCET_10_02_009
12. Конорев М. М., Нестеренко Г. Ф. К вопросу снижения негативного воздействия на окружающую среду массовых взрывов в карьерах // ГИАБ. 2005. № 1. С. 109–113. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-snizheniya-negativnogo-vozdeystviya-na-okruzhayuschuyu-sredu-massovykh-vzryvov-v-karierah> (дата обращения: 19.02.2023).
13. Барышев А. С., Казаков А. П. Механизм формирования и расчет зоны отбора газов при взрывных работах // Вентиляция шахт и рудников: межвуз. сб. 1980. Вып. 7. С. 99–105.
14. Зорин А. В. Влияние метеорологических условий на некоторые аспекты горного производства // Ученые записки. 2011. № 17. С. 56–63. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/17-8.pdf (дата обращения: 19.02.2023).
15. Стрелецкий А. А., Кубрин С. С. Необходимость использования метеорологических данных для повышения точности оценки траектории перемещения пылегазового облака после проведения массовых взрывов // Уголь. 2022. № S12. С. 49–52. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-49-52
16. Дугардыренов А. В., Анисимов В. Н., Семенов В. В. Об определяющих факторах формирования пылегазового облака при массовых взрывах на карьерах // ГИАБ. 2007. № 2. С. 43–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-opredelyayuschih-faktorah-formirovaniya-pylegazovogo-oblaka-pri-massovykh-vzryvah-na-karierah> (дата обращения: 19.02.2023).
17. Романов В. С., Чашников В. В. Особенности расчета загрязнения атмосферы рудников и карьеров от массовых взрывов при комбинированной отработке месторождений // Неделя горняка–98. 1999. № 4. С. 243–244.
18. Тихонова О. В. Результаты исследований процесса образования пылегазового облака на карьере ООО «ПГ Фосфорит» // Записки Горного института. 2006. № 167(1). С. 113–116. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/8080>
19. Юрченко А. А., Литвиненко А. А., Павличенко А. В., Гузь К. С. Оценка экологической опасности рассеивания газопылевого облака при массовых взрывах в карьерах // Форум гірників–2013: матер. міжнар. конф., 2–5 жовтня 2013, Дніпропетровськ, 2013. Т. 3. С. 31–39.
20. Zvyagintseva A. V., Sazonova S. A., Kulneva V. V. Analysis of sources of dust and poisonous gases in the atmosphere formed as a result of explosions at quarries of the mining and integrated works // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 962. P. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042045
21. Уколов Д. А., Звягинцева А. В. Оценка негативного воздействия пылегазовых смесей, образующихся при взрывах на карьерах, на окружающую среду // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2014. № 1(5). С. 1–4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-negativnogo-vozdeystviya-pylegazovykh-smesey-obrazuyuschih-sya-pri-vzryvah-na-karierah-na-okruzhayuschuyu-sredu> (дата обращения: 20.02.2023).
22. Юрченко А. А. Физические процессы выброса пылегазового облака при массовых взрывах в карьерах // Науковий вісник НГУ. 2010. № 2. С. 85–88.
23. Адушкин В. В., Соловьев С. П., Будников В. А. Литосферные источники аэрозольного загрязнения атмосферы // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. С. 103–110.
24. Дриженко А. Ю., Козенко Г. В., Рыкус А. А. Открытая разработка железных руд Украины. Состояние и пути совершенствования. Полтава: Полтавский литератор, 2009. 451 с.
25. Бересневич П. В., Лобода А. И. Способы и средства борьбы с вредными газами в железорудных карьерах // Черная металлургия: Бюл. НТИ. 1991. № 3. С. 4–13.
26. Юрченко А. А., Литвиненко А. А. Подавление пылевого облака после массового взрыва в карьере путем его орошения. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/104512> (дата обращения: 19.02.2023).
27. Ястребова К. Н. Повышение интенсивности естественного воздухообмена в рабочих зонах карьеров на основе аэродинамического профилирования подветренных бортов: дис. канд. техн. наук. URL: http://xn----etbhhdhsfui1b6f.xn--p1ai/system/files/lib/sci/aspirant-doctorant/avtoreferaty/2015/2015-3/yastrebova_dissertaciya.pdf (дата обращения: 21.02.2023).

28. Chugh Y. P., MdAzmi A. Z., Gurley H., Kollipara V. K., Hirschi J. CFD analysis of airflow distribution in high mining areas of room-and-pillar coal mining // Proc. of the 37th Intern. Symp. APCOM 2015, Fairbanks, Alaska. 2015. P. 911–920.
29. Tutak M., Brodny J. Influence of auxiliary ventilation devices on a distribution of methane concentration at the crossing of longwall and ventilation roadway // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2017. Vol. 17. No. 13. P. 437–444. DOI: 10.5593/sgem2017/13/S03.056
30. Gridina E. B., Andreev R. E. Mathematical modeling based on CFD method of wind currents in combined working out of the Olenegorsky pit in the Flowvision software package // International Review on Modelling and Simulations. 2017. Vol. 10. No. 1. P. 62–69. DOI: 10.15866/iremoss.v10i1.11101
31. Raj K. V. Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures: Ph. D. Thesis. URL: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756> (дата обращения: 19.02.2023).
32. Баширов Н. Р. Метод динамического проектирования отвалов при предварительной симуляции воздушного потока // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 2. С. 40–47. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-40-47
33. Амосов П. В., Козырев С. А., Назарчук О. В. Разработка компьютерной модели аэротермодинамики атмосферы карьера в Ansys Fluent // Известия СПбГТИ(ТУ). 2018. № 44(70). С. 121–125. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2018.44.121
34. Амосов П. В. Доминирующий фактор в паре «взрывные работы–ветровой режим» // Известия СПбГТИ(ТУ). 2020. № 54(80). С. 93–98. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-54-80-93-98
35. Накаряков Е. В., Семин М. А., Гришин Е. Л., Колесов Е. В. Анализ закономерностей накопления и выноса выхлопных газов от машин с двигателями внутреннего сгорания в тупиковых камерообразных горных выработках // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 5. С. 41–47. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-41-47
36. Амосов П. В. Численное моделирование процесса проветривания карьера при вариации местоположения пылегазового облака // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 7. С. 5–15 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-5-15
37. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. Вып. 4. С. 59–75. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75
38. Амосов П. В. Результаты анализа численного моделирования процесса проветривания карьера при различных местоположениях пылегазового облака и вариации скорости ветрового потока // Известия СПбГТИ(ТУ). 2022. № 60(86). С. 63–69. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-analiza-chislennogo-modelirovaniya-protsesta-provetrivaniya-kariera-pri-razlichnyh-mestopolozheniyah-pylegazovogo-oblaka> (дата обращения: 20.02.2023).
39. Конорев М. М., Нестеренко Г. Ф. Теоретические аспекты процессов формирования и подъема пылегазового облака при массовых взрывах в карьерах // ГИАБ. 2002. № 9. С. 1–4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-aspekty-protsesta-formirovaniya-i-podema-pylegazovogo-oblaka-pri-massovyh-vzryvah-v-karierah> (дата обращения: 20.02.2023).
40. Стрелецкий А. А., Кубрин С. С. Необходимость использования метеорологических данных для повышения точности оценки траектории перемещения пылегазового облака после проведения массовых взрывов // Уголь. 2022. № S12. С. 49–52. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-49-52
41. Мартыанов В. Л. Аэрология горных предприятий. Кемерово: КузГТУ, 2016. 100 с.
42. Ларичев А. Ю., Мазур А. С., Парамонов Г. П., Цимбалюк Т. А. К вопросу расчета пылегазового загрязнения атмосферы при производстве массовых взрывов на карьерах // Известия СПбГТИ (ТУ). 2010. № 8. С. 84–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-raschyota-pylegazovogo-zagryazneniya-atmosfery-pri-proizvodstve-massovyh-vzryvov-na-karierah> (дата обращения: 19.02.2023).
43. Менжулин М. Г. Формирование пылевых фракций при взрывном разрушении горных пород // Взрыв: межвуз. сб. науч. тр. ИГД. Алма-Аты, 1997. С. 152–155.
44. Зберовський О. В., Савотченко О. М. Дослідження параметрів формування і розвитку пилогазової хмари в атмосфері при масових вибухах у кар'єрах // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2014. № 45. С. 138–145.
45. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines // Applied Ecology and Environmental Research. 2019. Vol. 17. No. 5. P. 10313–10333. DOI: 10.15666/aecer/1705_1031310333
46. Reed W. R. Significant dust dispersion models for mining operations // Information Circular 9478. 2005. No. 2005–138.
47. Khazins V. M., Shuvalov V. V., Soloviev S. P. Numerical modeling of formation and rise of gas and dust cloud from large scale commercial blasting // Atmosphere. 2020. No. 11. P. 1112. DOI: 10.3390/atmos11101112
48. Shuvalov V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows // Application to the Thermal Layer Effect. Shock Waves. 1999. No. 9. P. 381–390.

49. Shuvalov V., Artemieva N., Kosarev I. 3D hydrodynamic code SOVA for multimaterial flows, application to Shoemakerlevy 9 comet impact problem // *International Journal of Impact Engineering*. 1999. No. 23. P. 847–858.
50. Андреев С. Г. Физика взрыва. Т. 1. М.: Физматлит, 2004. С. 823–856.
51. Андреев С. Г. Физика взрыва. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. С. 648–723.
52. Васильев А. А., Ждан С. А. Параметры взрывной волны при взрывании в цилиндрической взрывной камере // *Физика горения взрыва*. 1981. № 17. С. 99–105.
53. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965. С. 465–475.
54. Tompson S. L., Lauson H. S. Improvements in the chart d radiation-hydrodynamic code III: revised analytic equation of state: Report SC-RR-71 0714. USA, NM, Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1974. 121 p.
55. Konorev M. M., Nesterenko G. F. Ventilation and dust and gas suppression in the atmosphere of open pits. Ekaterinburg: IM UB RAS Publishing; 2000. 43 p. (In Russ.)
56. Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты: Кол. фил. АН СССР, 1988. 197 с.

Поступила в редакцию 23 мая 2023 года

Сведения об авторах:

Гендлер Семен Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности производств Санкт-Петербургского горного университета. E-mail: gendler_sg@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7721-7246>

Медова Екатерина Алексеевна – аспирант Санкт-Петербургского горного университета. E-mail: s225057@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6614-2181>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-132-143

Ensuring the aerologic safety of open pit workforce under large-scale blasting

Semen G. Gendler¹, Ekaterina A. Medova¹

¹ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

Abstract

Research objective is to justify the need for a reliable prediction of air stagnation zone location and geometry. The study also aims at justifying the choice of a fresh air positive feed method for destroying the air stagnation zone and removing contaminants from the open pit without sacrificing aerological safety after a large-scale blast.

Methods of research. The article considers the conditions and characteristics of air stagnation zones formed after large-scale blasts. The research determined the dependence between the conditions of the dust and gas cloud formation and the parameters of drilling and blasting.

Results and analysis. The existing methods for determining air stagnation zones indicators are analyzed. A method for deep open pit ventilation is proposed. The method effectively prevents the formation of zones where the concentration of contaminants exceeds the permissible exposure limit. It is achieved by injecting air and diluting it through pipelines in mine workings that open into the junction of slopes and benches.

Conclusions and scope of results. The results can be applied to determine future methods allowing to implement the principle of “requested ventilation”, since a distinctive feature of the formation of air stagnation zones in open pits after large-scale blasts is their temporary nature, determined by exceed permissible exposure limit for contaminants. The duration of the aerodynamic impact on air stagnation zones should be equal to the duration of their destruction period until the standard air conditions are reached; it should also be of a periodic nature and coincide with the schedule of large-scale blasts.

Keywords: aerogasdynamic processes; open-pit mining; contaminants; air stagnation zone; ventilation methods.

REFERENCES

1. Kozyrev S. A., Amosov P. V. Ways of atmosphere normalization of deep open-pits. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Journal of Murmansk State Technical University*. 2014; 17(2): 231–237. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107

2. Shakhrai S. G., Kurchin G. S., Sorokin A. G. New technical solutions for ventilation in deep quarries. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2019; 240: 654–659. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2019.6.654
3. Gendler S. G., Borisovskii I. A. Управление аэродинамическими процессами при разработке золоторудных месторождений открытым способом. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 2: 99–107. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107
4. Rudakov M., Babkin R., Medova E. Improvement of working conditions of mining workers by reducing nitrogen oxide emissions during blasting operations. *Application Sciences*. 2021; 11: 9969. Available from: doi: 10.3390/app11219969
5. Vasserman A. D., Kozyrev S. A. Scientific fundamentals for creating and maintaining the safe state of air when developing a mineral deposit. In: *Forming the fundamentals of modern strategy of natural resource management in Euro-Arctic region*. Apatity: KSC RAS Publishing; 2005. p. 144–149. (In Russ.)
6. Paramonov G. P., Fedoseev A. V., Gaponov Iu. S. Assessing the impact of rock mass fracturing on its breaking in the course of blasting. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2013; 204: 294. (In Russ.) Available from: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5593> [Accessed 06 June 2023].
7. Afanasiev P. I., Pasyukov A. V., Kurta I. V. Optimal parameters for drilling explosions when developing coal deposits by open-pit method. In: *E3S Web of Conferences*. 2020; 164: 1–7.
8. Kozyrev S. A., Vlasova E. A. Gas hazard of explosives used in the mining industry. *Gornaia promyshlennost = Mining Industry*. 2021; 5: 106–111. (In Russ.) Available from: doi: 10.30686/1609-9192-2021-5-106-111
9. Isheiskii V., Sanchidrián J. A. Prospects of applying MWD technology for quality management of drilling and blasting operations at mining enterprises. *Minerals*. 2020; 10: 925. Available from: doi: 10.3390/min10100925
10. Babkin R. S., Paramonov G. P. *Borehole stemming*. Patent RF no. 182481; 2018. (In Russ.)
11. Korshunov G. I., Andreev R. E., Gridina E. B. Calculation of gas-dynamic parameters in powder chamber of a blast hole. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019; 2: 69–78. Available from: doi: https://iaeme.com/Home/article_id/IJCIET_10_02_009
12. Konorev M. M., Nesterenko G. F. Regarding the reduction of the negative environmental effect from large-scale blasts in open pits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2005; 1: 109–113. (In Russ.) Available from: doi: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-snzheniya-negativnogo-vozdeystviya-na-okruzhayushchuyu-sredu-massovyh-vzryvov-v-karierah> [Accessed 19 February 2023].
13. Baryshev A. S., Kazakov A. P. Formation mechanism and calculation of gas sampling area when blasting. In: *Ventilation in shafts and mines: interuniversity collected papers*. 1980; 7: 99–105. (In Russ.)
14. Zorin A. V. Influence of meteorological conditions on some aspects of mining operations. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Proceedings of Russian State Hydrometeorological University*. 2011; 17: 56–63. (In Russ.) Available from: http://elibr.rshu.ru/files_books/pdf/17-8.pdf [Accessed 19 February 2023]. (In Russ.)
15. Streletskii A. A., Kubrin S. S. The need to use meteorological data to improve the accuracy of estimating the trajectory of a dust and gas cloud after mass explosions. *Ugol = Coal*. 2022; S12: 49–52. (In Russ.) Available from: doi: 10.18796/0041-5790-2022-S12-49-52
16. Dugartsyrenov A. V., Anisimov V. N., Semenov V. V. On the main factors of dust and gas cloud formation under large-scale blasting in open pits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2007; 2: 43–51. (In Russ.) Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-opredelyayuschih-faktorah-formirovaniya-pylegazovogo-oblaka-pri-massovyh-vzryvah-na-karierah> [Accessed 19 February 2023].
17. Romanov V. S., Chashnikov V. V. Aspects of calculating mine and pit air pollution from large-scale blasts under combined development of deposits. In: *The Miner's Week–98: Symposium proceedings*. 1999; 4: 243–244. (In Russ.)
18. Tikhonova O. V. Results of research into the process of dust and gas cloud formation in the open pit of OOO PG Fosforit. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2006; 167(1): 113–116. (In Russ.) Available from: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/8080>.
19. Iurchenko A. A., Litvinenko A. A., Pavlichenko A. V., Guz K. S. Assessing the environmental hazard of dust and gas cloud dispersion under large-scale blasting in open pits. In: *Miners' Forum–2013: Proceedings of Internat. conf., 2–5 October 2013, Dnepropetrovsk*; 2013; 3: p. 31–39. (In Russ.)
20. Zvyagintseva A. V., Sazonova S. A., Kulneva V. V. Analysis of sources of dust and poisonous gases in the atmosphere formed as a result of explosions at quarries of the mining and integrated works. In: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020; 962: 1–7. Available from: doi: 10.1088/1757-899X/962/4/042045
21. Ukolov D. A., Zviagintseva A. V. Assessing the negative environmental impact of dust and gas mixtures from blasting in open pits. In: *Modern technologies for civil defense and emergency measures*. 2014; 1(5): 1–4. (In Russ.) Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-negativnogo-vozdeystviya-pylegazovyh-smesey-obrazuyuschih-sya-pri-vzryvah-na-karierah-na-okruzhayushchuyu-sredu> [Accessed 20 February 2023].

22. Iurchenko A. A. Physical processes of dust and gas cloud emission under large-scale blasting in open pits. *Naukovii visnik NGU = Scientific Bulletin of NSU*. 2010; 2: 85–88. (In Russ.)
23. Adushkin V. V., Soloviev S. P., Budnikov V. A. Lithosphere sources of airborne contamination. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 1995; 36(8): 103–110. (In Russ.)
24. Drizhenko A. Iu., Kozenko G. V., Rykus A. A. *Open mining of iron ore in Ukraine. State and opportunities for improvement*. Poltava: Poltavskii literator Publishing; 2009. (In Russ.)
25. Beresnevich P. V., Loboda A. I. Methods and means of protection from harmful gas in iron-ore open pits. *Chernaia metallurgii: Biul. NTI = Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific and Technical Information*. 1991; 3: 4–13. (In Russ.)
26. Iurchenko A. A., Litvinenko A. A. *Dust suppression after huge blast in quarry by means of sprinkling*. (In Russ.) Available from: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/104512> [Accessed 19 February 2023].
27. Iastrebova K. N. *Improving the intensity of natural air exchange in the work areas of open pits based on the aerodynamic profiling of the lee sides: PhD in Eng. abstract of diss.* (In Russ.) Available from: http://xn----etbhhdhsfiu1b6f.xn--p1ai/system/files/lib/sci/aspirant-doctorant/avtoreferaty/2015/2015-3/yastrebova_dissertaciya.pdf [Accessed 21 February 2023].
28. Chugh Y. P., MdAzmi A. Z., Gurley H., Kollipara V. K., Hirschi J. CFD analysis of airflow distribution in high mining areas of room-and-pillar coal mining. In: *Proc. of the 37th Intern. Symp. APCOM 2015, Fairbanks, Alaska*. 2015. p. 911–920.
29. Tutak M., Brodny J. Influence of auxiliary ventilation devices on a distribution of methane concentration at the crossing of longwall and ventilation roadway. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2017; 17(13): 437–444. Available from: doi: 10.5593/sgem2017/13/S03.056
30. Gridina E. B., Andreev R. E. Mathematical modeling based on CFD method of wind currents in combined working out of the Olenegorsky pit in the Flowvision software package. *International Review on Modelling and Simulations*. 2017; 10(1): 62–69. Available from: doi: 10.15866/iremos.v10i1.11101
31. Raj K. V. *Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures: Ph. D. Thesis*. Available from: doi: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756> [Accessed 19 February 2023].
32. Bashirov N. R. Method of dumping sites dynamic design with preliminary simulation of air flow. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 2: 40–47. (In Russ.) Available from: 10.21440/0536-1028-2018-2-40-47
33. Amosov P. V., Kozyrev S. A., Nazarchuk O. V. Creating computer model of atmosphere aero-thermodynamics of open pit in Ansys Fluent. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta = Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2018; 44(70): 121–125. (In Russ.) Available from: doi: 10.15217/issn1998984-9.2018.44.121
34. Amosov P. V. Dominant factor in the pair “blasting-wing mode”. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta = Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2020; 54(80): 93–98. (In Russ.) Available from: doi: 10.36807/1998-9849-2020-54-80-93-98
35. Nakariakov E. V., Semin M. A., Grishin E. L., Kolesov E. V. Analysis of the regularities of accumulation and removal of the exhaust gases from the combustion-engined vehicles in the dead-end chamber-like mine workings. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2021; 5: 41–47. (In Russ.) Available from: doi: 10.24000/0409-2961-2021-5-41-47
36. Amosov P. V. Numerical modeling of open pit ventilation when varying the location of the dust and gas cloud. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 7: 5–15 (In Eng.). Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-7-5-15
37. Gendler S. G., Borisovskii I. A. Estimation of peculiarities of temperature inversion formation in open mining in the arctic conditions. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 4: 59–75. (In Russ.) Available from: doi: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75
38. Amosov P. V. The results of the analysis of numerical simulation of the process of ventilation of the open pit at different locations of the dust and gas cloud and variation of wind flow velocity. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta = Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2022; 60(86): 63–69. (In Russ.) Available from: doi: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-analiza-chislennogo-modelirovaniya-protsesta-provetrivaniya-kariera-pri-razlichnyh-mestopolozheniyah-pylegazovogo-oblaka> [Accessed 20 February 2023].
39. Konorev M. M., Nesterenko G. F. Theoretical aspects of dust and gas cloud formation and raise during large-scale blasting in open pits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnikeskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2002; 9: 1–4. (In Russ.) Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-aspekty-protsesov-formirovaniya-i-podema-pylegazovogo-oblaka-pri-massovykh-vzryvakh-v-karierah> [Accessed 20 February 2023].
40. Streletskii A. A., Kubrin S. S. The need to use meteorological data to improve the accuracy of estimating the trajectory of a dust and gas cloud after mass explosions. *Ugol = Coal*. 2022; S12: 49–52. (In Russ.) Available from: doi: 10.18796/0041-5790-2022-S12-49-52

41. Martianov V. L. *Aerology of mining enterprises*. Kemerovo: KuzSTU Publishing; 2016. (In Russ.)
42. Larichev A. Iu., Mazur A. S., Paramonov G. P., Tsimbaliuk T. A. On the problem of calculating dust and gas contamination of atmosphere when carrying out large-scale blasting in open pits. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta = Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2010; 8: 84–88. (In Russ.) Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-raschyota-pylegazovogo-zagryazneniya-atmosfery-pri-proizvodstve-massovykh-vzryvov-na-karierakh> [Accessed 19 February 2023].
43. Menzhulin M. G. Dust fractions formation when cutting rock by blasting. In: *Explosion: Interuniversity Proceedings of the Mining Institute*. Almaty; 1997. p. 152–155. (In Russ.)
44. Zberovskii O. V., Savotchenko O. M. Studying the parameters of the dust and gas cloud formation and development in the atmosphere during large-scale blasting in open pits. *Collection of Research Papers of the National Mining University*. 2014; 45: 138–145. (In Ukr.)
45. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019; 17(5): 10313–10333. Available from: doi: 10.15666/aecer/1705_1031310333
46. Reed W. R. Significant dust dispersion models for mining operations. In: *Information Circular 9478*. 2005; 2005–138.
47. Khazins V. M., Shuvalov V. V., Soloviev S. P. Numerical modeling of formation and rise of gas and dust cloud from large-scale commercial blasting. *Atmosphere*. 2020; 11: 1112. Available from: doi: 10.3390/atmos11101112
48. Shuvalov V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect. *Shock Waves*. 1999; 9: 381–390.
49. Shuvalov V., Artemieva N., Kosarev I. 3D hydrodynamic code SOVA for multimaterial flows, application to Shoemakerlevy 9 comet impact problem. *International Journal of Impact Engineering*. 1999; 23: 847–858.
50. Andreev S. G. *Explosion Physics. Vol. 1*. Fizmatlit Publishing; 2004. p. 823–856. (In Russ.)
51. Andreev S. G. *Explosion Physics. Vol. 2*. Fizmatlit Publishing; 2004. p. 648–723. (In Russ.)
52. Vasiliev A. A., Zhdan S. A. Shock-wave parameters on explosion of a cylindrical charge in air. *Fizika gorenii i vzryva = Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1981; 17: 99–105. (In Russ.)
53. Kuznetsov N. M. *Thermodynamic functions and shock adiabats of air at high temperatures*. Moscow: Mashinostroenie Publishing; 1965. p. 465–475.
54. Tompson S. L., Lauson H. S. *Improvements in the CHART D radiation-hydrodynamic code III: revised analytic equation of state*. Albuquerque: Sandia National Laboratory Publishing; 1974.
55. Konorev M. M., Nesterenko G. F. *Induced ventilation and dust-and-gas suppression in open pit atmosphere*. Ekaterinburg: IM UB RAS Publishing; 2000. (In Russ.)
56. Baklanov A. A. *Numerical modeling in mine aerology*. Apatity: KB AS RAS; 1987. (In Russ.)

Received 23 May 2023

Information about the authors:

Semen G. Gendler – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Industrial Safety, Saint Petersburg Mining University. E-mail: gendler_sg@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7721-7246>
Ekaterina A. Medova – PhD student, Department of Industrial Safety, Saint Petersburg Mining University. E-mail: s225057@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6614-2181>

Для цитирования: Гендлер С. Г., Медова Е. А. Обеспечение аэрологической безопасности рабочего персонала карьеров при массовых взрывах // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 4. С. 132–143. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-132-143

For citation: Gendler S. G., Medova E. A. Ensuring the aerologic safety of open pit workforce under large-scale blasting. *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 4: 132–143 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-132-143