

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.271.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-15-25



АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ

Сергеев В.В.¹, Герасименко Т.Е.¹, Евдокимов С.И.¹, Герасименко Н.П.²

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия

² Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

Аннотация. Постановка задачи. Повышение эффективности проветривания карьеров и ликвидация застойных зон актуализируются при увеличении глубины открытых горных работ. Повысить эффективность проветривания возможно интенсификацией воздушных потоков в карьерном пространстве за счет реализации технических решений, направленных на вовлечение естественных воздушных потоков в локальные потоки, создаваемые работой вентиляционных установок. **Цель работы.** Разработка технического решения, обеспечивающего повышение эффективности и упрощение проветривания карьеров, снижение энергетических и материальных затрат, а также исследование эффективности разработанного способа с помощью компьютерного моделирования. **Новизна.** По сравнению с известными аналогами в разработанном способе вентиляционную установку размещают на дне карьера, создавая с ее помощью направленный вертикальный поток, а также вдоль бортов карьера, создавая с их помощью закрученный по спирали воздушный поток, скорость которого регулируют изменением расхода и напора воздуха вентиляционными установками. **Результат.** При реализации разработанного способа создаются все условия для поддержания движения воздушных масс по всей глубине карьера, их функционирование и регулирование и, следовательно, эффективное проветривание в зависимости от места и глубины проведения горных работ. **Практическая значимость.** Полученные с помощью компьютерного моделирования результаты скоростей воздушных потоков позволяют оценить эффективность проветривания карьера при различном количестве и мощности вентиляционных установок и подобрать оптимальные режимы для реальных условий разработки месторождений открытым способом.

Ключевые слова: карьер, способы проветривания, интенсификация проветривания, эффективность проветривания, оптимальные условия проветривания

© Сергеев В.В., Герасименко Т.Е., Евдокимов С.И., Герасименко Н.П., 2022

Для цитирования

Анализ технических решений для повышения эффективности проветривания глубоких карьеров / Сергеев В.В., Герасименко Т.Е., Евдокимов С.И., Герасименко Н.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 15-25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-15-25>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ANALYSIS OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR INCREASING EFFICIENCY OF VENTILATION OF DEEP OPEN PITS

Sergeev V.V.¹, Gerasimenko T.E.¹, Evdokimov S.I.¹, Gerasimenko N.P.²

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

² Kuban State University, Krasnodar, Russia

Abstract. Problem Statement. An increase in efficiency of open pit ventilation and the elimination of stagnant zones are of particular relevance with an increase in depth of open pit mining. It is possible to increase efficiency of ventilation by intensifying air flows in the pit space and implementing technical solutions aimed at involving natural air flows into local flows created by the operation of ventilation units. **Objective.** The research is aimed at developing a technical solution that improves efficiency and simplifies the ventilation of open pits, reduces energy and material costs, and studying efficiency of the developed method using a computer simulation. **Originality.** Compared to the known similar solutions, the ventilation units in the developed method are placed at the bottom of the open pit, creating a directed vertical flow, and along the sides of the pit, creating a spiral air flow, whose speed is controlled by changing the air flow rate and pressure by the ventilation units. **Findings.** When implementing the developed method, all conditions are created to maintain the movement of air masses throughout the depth of the open pit, their functioning and control, and, consequently, efficient ventilation depending on the place and depth of mining. **Practical Relevance.** The computer simulation of air flow velocities contributes to evaluating efficiency of the open pit ventilation with a various number and power of ventilation units, and to selecting the optimal modes for actual conditions of open pit mining.

Keywords: open pit, ventilation methods, ventilation intensification, ventilation efficiency, optimal ventilation conditions

For citation

[Sergeev V.V.], Gerasimenko T.E., Evdokimov S.I., Gerasimenko N.P. Analysis of Technical Solutions for Increasing Efficiency of Ventilation of Deep Open Pits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 15-25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-15-25>

Введение

Безопасности условий труда рабочих и надежности работы технологического оборудования уделяется большое внимание при осуществлении производственных процессов, в частности при разработке месторождений открытым способом [1, 2]. Основным обязательным нормативным документом для выполнения работ всеми организациями и регламентирующим деятельность в этой области являются «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», утвержденные Приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 №505, вступившим в силу 1 января 2021 г.

В открытых карьерах основным источником пыли являются взрывные работы. Их вклад в пылеобразование составляет ≈90-96% при интенсивности пылевыведения 500-4200 мг/м³ [3]. Повышенные концентрации пыли и вредных газов могут быть опасными как для работников карьеров, так и для надежной работы оборудования. Поэтому успешное решение вопросов борьбы с пылью и газами в карьерах является весьма актуальной задачей.

Повышения эффективности проветривания глубоких карьеров и ликвидация застойных зон актуализируются при увеличении глубины открытых горных работ. Повысить эффективность проветривания возможно интенсификацией воздушных потоков в карьерном пространстве за счет использования различных технических решений, направленных на вовлечение естественных воздушных потоков в локальные искусственные потоки, создаваемые работой вентиляционных установок. Для максимально эффективного объединения естественных условий и искусственных воздушных потоков необходимо учитывать микроклимат в атмосфере карьеров, а именно температуру воздуха, его влажность, ветровые потоки, а также сезонные климатические условия, преобладающие в том или ином регионе.

На основании анализа [4-12], проведенного авторами статьи, установлено, что наиболее эффективной схемой проветривания карьера является использование струй воздуха, создаваемых мобильными устройствами, легко перемещающимися в карьерном пространстве, что позволяет увеличить объем воздуха, вовлекаемого в турбулентный поток, за счет эффекта резонанса вихревых потоков.

Технические и технологические разработки

При разработке технических решений важным этапом является анализ источников технической информации, наиболее представительным и исчерпывающим источником которой является патентная информация. Доступ к патентным документам осуществляется через государственные патентные ведомства, находящиеся в открытом доступе. Анализ патентно-технической информации по Российской Федерации, КНР, США и Германии показал, что практически все способы проветривания глубоких карьеров и устройства для их осуществления имеют целью повысить эффективность проветривания рабочего пространства с минимальными энергетическими и материальными затратами, при обеспечении контроля и управляемости вихревой вентиляционной воронкой [13-17]. Причем Российская Федерация является лидером в разработке способов проветривания глубоких карьеров и устройств для их осуществления. Это подтверждает, что наша страна занимает ведущие позиции в технологиях разработки месторождений полезных ископаемых и уделяет существенное внимание безопасности условий труда рабочих.

В Северо-Восточном федеральном университете им. М.К. Аммосова разработан способ проветривания карьера [13], в котором проветривание осуществляют за счет следующей последовательности действий (рис. 1):

- создают восходящий вихревой столб путем расположения вентиляционных установок вокруг рабочей зоны карьера и направляют воздушные потоки вентиляционных струй к рабочей зоне;

- формируют восходящий воздушный поток в центральной части рабочей зоны в виде вихревого столба вращения путем закручивания его по периметру потоками вентиляционных струй;

- направляют вентиляционные струи внутрь рабочей зоны по касательной к окружности основания вихревого столба, диаметр которого регулируют изменением угла наклона осей вентиляционных установок относительно столба;

- контролируют скорость вращения столба изменением производительности вентиляционных установок;

- изменяют плотность воздуха в вентиляционных струях нагреванием за счет сжигания горючего топлива в реактивных двигателях либо нагреванием и увлажнением с помощью подачи горячего пара и создания водяного тумана пушками.

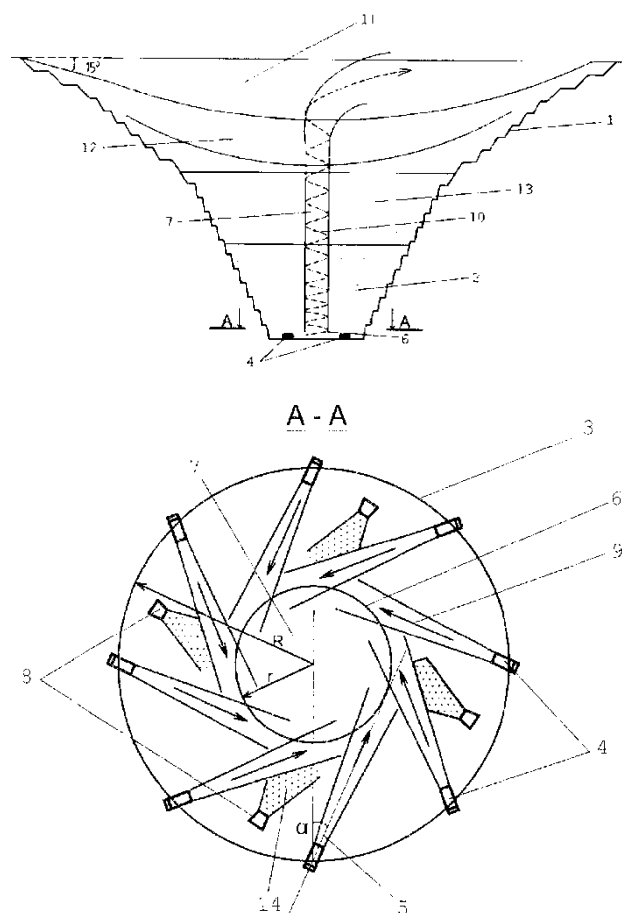


Рис. 1. Схема проветривания карьера: 1 – карьер; 2 – рабочая зона; 3 – контур установки вентиляторов; 4 – вентиляционные установки; 5 – продольная ось вентиляционных струй; 6 – основание вихревого столба; 7 – вихревой столб; 8 – водяная пушка; 9 – вентиляционные струи; 10 – спираль вихревого столба; 11 – зона ветровой активности; 12 – зона рециркуляции; 13 – инверсионная пробка; 14 – струи пара

Fig. 1. Open pit ventilation process flow chart: 1 is an open pit; 2 is an operating area; 3 is a line of installed fans; 4 is ventilation units; 5 is a longitudinal axis of air flows; 6 is a base of the rotating air column; 7 is a rotating air column; 8 is a water cannon; 9 is air flows; 10 is a spiral of the rotating air column; 11 is a wind activity zone; 12 is a recirculation zone; 13 is an inversion seal; 14 is steam jets

Изменение производительности вентиляционных установок выполняют одновременно либо попарно с противоположных сторон периметра рабочей зоны. До начала проветривания обеспыливают площадь основания вихревого столба орошением воды на пылящиеся поверхности и ее замораживанием.

Проанализировав последовательность существенных признаков технического решения [13], авторы статьи пришли к выводу, что при реализации данного способа нет возможности получить технический результат из-за известных физических явлений, основанных на законах аэродинамики и сохранения массы. Если создавать восходящий вихревой поток только в центральной части карьера, то из-за неразрывности потока воздух на дне карьера должен пополняться воздухом с бортов карьера. Так как воздух спускается вниз, то он должен закрутиться против часовой стрелки из-за сил Кориолиса. Для этого должны быть созданы условия, побуждающие это движение воздуха, которые отсутствуют в данном способе. Поэтому воздух будет поступать с бортов карьера, но не по всей его глубине, а лишь с небольшой высоты от дна, а вертикальный вихревой столб будет рассеиваться, не достигнув поверхности карьера, и стекать вниз, вовлекаясь в круговорот. То есть имеет место перемешивание воздуха в нижней части карьера, но не проветривание карьера по всей его глубине.

В способе проветривания карьера в [13] создается попытка вызвать такое природное явление, как циклон, внутри которого формируется восходящий воздушный поток на максимально возможную высоту. При этом осуществляют подогрев вентиляционных струй, направленных по касательной к окружности вихревого столба, а также нагревают путём неконтролируемого сжигания горючих материалов внутри основания вихревого столба. Этими усилиями создаются условия для облегчения создания вихревого столба с подсосом воздуха с бортов карьера. Этому же способствует и естественный температурный градиент, то есть повышение температуры на 1°C на каждые 100 м, что, в конечном счете, например, на глубине 600 м создает температуру пород на 6°C выше, чем на поверхности. Для облегчения воздуха и повышения высоты вертикального столба применяют еще и впрыскивание водяного тумана в зону основания вертикального столба, но это эффективно только для пылеподавления, так как из водяного тумана образуются либо капли – в летнее время, либо снежинки – в зимнее время, центром осаждения или кристаллизации которых являются частицы пыли. Однако для создания вертикального столба это явление имеет противоположный эффект, так как воздушные струи охлаждаются за счет дополнительного испарения капель или снежинок. Всех используемых мер недостаточно для создания восходящего воздушного потока на всю глубину карьера, например 800 м, поэтому воздушный поток рассеется на некоторой глубине, разнеся снег по бор-

там карьера зимой или капли воды летом, благодаря центробежным силам. Таким образом, в данном способе имеем практически полное пылеподавление с частичной нейтрализацией вредных газов с циркуляцией воздушных масс на нижних горизонтах карьера – снежный фонтан внутри карьера, но не его эффективную вентиляцию. В летнее время будем иметь внутри карьера дождевой фонтан с увлажнением бортов карьера на уровне рассеивания вертикального воздушного потока. Воздушные массы, освободившись от снега или водяных капель, спускаются вниз, где снова вовлекаются в круговорот.

Известен способ проветривания [14], согласно которому проветривание карьера происходит за счет обеспечения создания непрерывного потока воздуха вдоль восходящей конической винтовой линии (**рис. 2**), на которой расположены вентиляционные установки. Проветривание карьера при этом осуществляется, во-первых, благодаря выносу непосредственно струей, создаваемой установками, во-вторых, вследствие подсоса воздуха в центре карьера и выброса на периферии, которые возникают из-за разности давлений, обусловленных вращательным движением воздуха во всем объеме карьера.

При этом, как видно на **рис. 2**, поток закручивается против часовой стрелки с выносом наружу. Однако закрученные внешние слои воздуха, движущиеся против часовой стрелки в северном полушарии Земли, образуют циклон, в котором внешние слои из-за действия сил Кориолиса перемещаются внутрь и, достигнув дна, устремляются вертикально вверх, а не наоборот. То есть все действия вентиляторных установок направлены на создание противотока естественным процессам. Такое явление наблюдается в Санкт-Петербурге, когда вода из Финского залива движется навстречу течению Невы, поднимая в ней уровень воды и затопливая город и окрестности. Таким образом, данное техническое решение не только не обеспечивает проветривание карьера, но даже не обеспечивает перемешивание воздушных масс внутри карьера, а запирает воздух внутри него.

В разработанном Красноярской государственной академией цветных металлов и золота способе проветривания глубоких карьеров [15] нагнетание или отсасывание воздуха осуществляют через подземные горные выработки, а воздухообмен между атмосферой карьера и окружающей средой осуществляют по трубопроводам легче воздуха, которые перемещают в выработанном пространстве карьера (**рис. 3**).

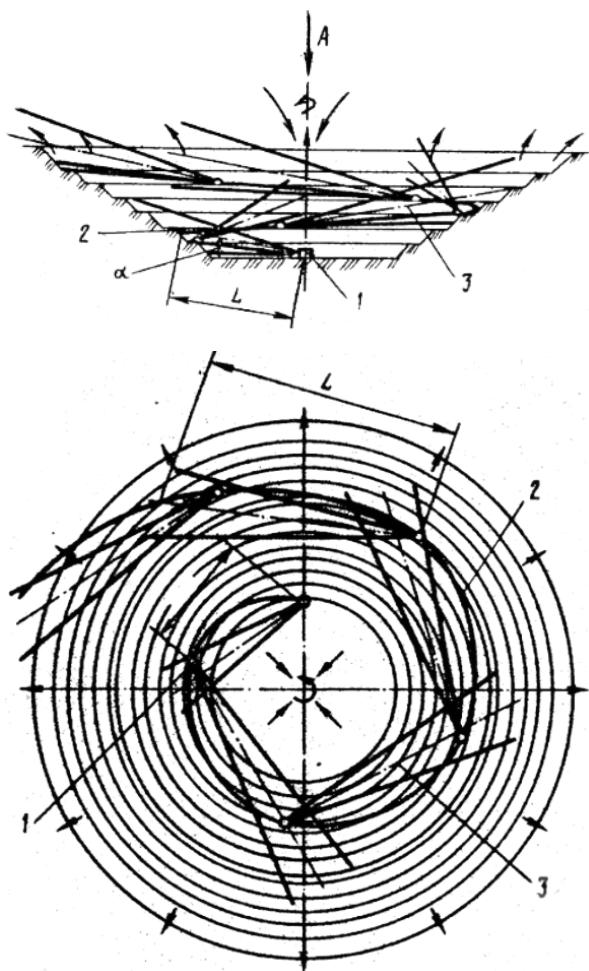


Рис. 2. Схема проветривания карьера:

- 1 – вентиляционные установки;
- 2 – восходящая винтовая линия;
- 3 – воздушные струи

Fig. 2. Open pit ventilation process flow chart:

- 1 is ventilation units; 2 is an upstream helical line; 3 is air jets

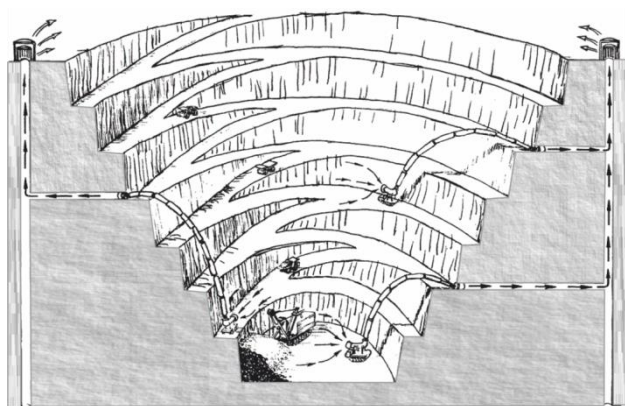


Рис. 3. Схема проветривания карьера через подземные горные выработки

Fig. 3. Open pit ventilation process flow chart using underground mining workings

Эффективность воздействия вентиляционной системы на атмосферу карьера осуществляется за счет перемещения трубопровода по рабочим площадкам с помощью самоходного устройства. Несмотря на высокую эффективность проветривания, этот способ имеет существенный недостаток, а именно сложность реализации. Это связано с тем, что подготовительный этап требует проведения дополнительных дорогостоящих горных работ, таких как проходку и поддержание стволов вокруг карьера и штолен для связи выработанного пространства карьера со стволами. Следует отметить, что данное техническое решение эффективно в основном при ликвидации локальных очагов пылевыведения, таких как взрывные работы, буровые работы, уборка горной массы, для чего воздухоприемные устройства устанавливают на шасси автомобиля. При этом общая запыленность карьера от других, не охваченных источников пылевыведения данным способом не контролируется.

Еще одной отечественной разработкой стал способ искусственной вентиляции глубоких карьеров [16], в котором на одном из верхних горизонтов размещают вентиляционную установку для создания наклонной нисходящей струи (рис. 4). Внизу карьера размещают вентиляционную установку для создания восходящей струи. В зоне действия струй устанавливают плавучие надувные заграждения, удерживаемые и управляемые с земли тросами посредством передвижных лебедок. Одно надувное заграждение заполняют гелием для поддержания необходимого избыточного давления газа, а второе надувное заграждение заполняют горячим воздухом. Регулирование скорости вентиляционного потока осуществляют изменением угла наклона и высоты расположения заграждений.

Этот способ, так же как и предыдущий, требует дополнительных материальных затрат на изготовление довольно больших надувных заграждений, заполняемых гелием и горячим воздухом, поддержания их заданного положения в пространстве над карьером лебедками. Еще одним недостатком является образование застойных зон, связанных с геометрией карьера. Округлая, а не прямоугольная форма карьера при подобном формировании воздушных потоков не позволяет достичь заявленного данного технического результата по эффективности проветривания. Кроме того, на эффективность проветривания сильно влияет направление естественных атмосферных воздушных потоков над

карьером. Наибольший эффект будет при попутном восходящей струе ветре, а при встречном или боковом ветре струя будет затормаживаться или сноситься в сторону от заграждения, что приведет к потере эффективности проветривания по данному способу.

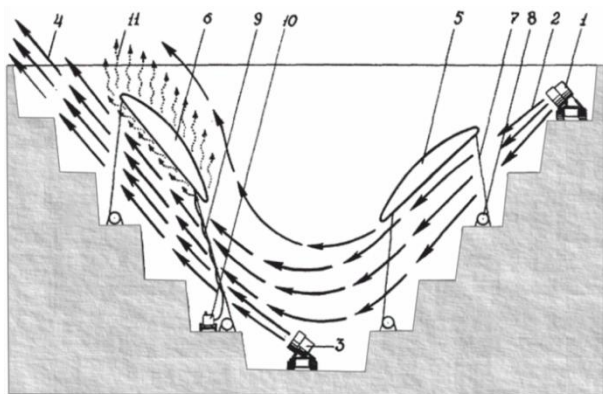


Рис. 4. Схема искусственной вентиляции глубоких карьеров: 1, 3 – вентиляционные установки; 2 – нисходящая воздушная струя; 4 – восходящая воздушная струя; 5, 6 – плавучие надувные заграждения; 7 – тросы; 8 – передвижные лебедки; 9 – воздуховод; 10 – калорифер; 11 – восходящие конвективные потоки

Fig. 4. Deep open pit forced ventilation process flow chart: 1, 3 are ventilation units; 2 is a downstream air jet; 4 is an upstream air jet; 5, 6 are floating inflatable barriers; 7 is ropes; 8 is travelling hoists; 9 is an air duct; 10 is a heater; 11 is downstream convective flows

Результаты исследования и их обсуждение

Проанализировав недостатки технических решений, был разработан способ проветривания карьера [17], согласно которому на уступах 2 вдоль бортов карьера и на дне 3 карьера вдоль его центральной оси устанавливают вентиляционные установки 1 (рис. 5). Количество установок 1 зависит от глубины и внутреннего объема карьера. Вдоль бортов 2 карьера создают антициклон (рис. 5, а), закручивая воздушные массы по часовой стрелке, а в центре карьера создают направленный нисходящий вертикальный поток, создавая повышенное давление на дне 3 карьера. При создании циклона (рис. 5, б) воздушный поток закручивают против часовой стрелки, а в центре карьера создают направленный восходящий вертикальный поток путем создания пониженного давления на дне 3 карьера. Для корректировки вентиляционной ситуации в карьере, изменяющейся с изменением геометрии карьера, а именно глубины, диаметра, все вентиляцион-

ные установки 1 для лучшей мобильности размещают на прицепе 4 тягача 5 (рис. 5, в), позволяющего легко перемещать их в нужное место.

Для создания вертикально направленного потока вентиляционную установку 1 размещают на раме 6, которую устанавливают вертикально с помощью подъемного механизма 7 (рис. 5, г). Во избежание разрушения поверхности карьера под сопло воздуходувной установки укладывают постель 8. Для снижения материальных затрат на осуществление способа максимально сокращают коммуникации на прокладывание кабелей или трубопроводов для снабжения вентиляционных установок 1 электроэнергией или топливом за счет снабжения установок блоком питания 9. В качестве питания может быть использована передвижная электростанция для электрических вентиляторов или топливный бак для реактивных или турбореактивных двигателей. Регулирование скорости направленного воздушного потока, омывающего борта карьера, производят за счет изменения расхода и напора воздуха вентиляционными установками 1.

Данный способ по сравнению с прототипом позволяет исключить образование застойных зон, что существенно повышает эффективность проветривания. Целью разработки данного способа является создание в необходимом месте и в нужное время таких природных явлений, как циклон или антициклон и управление ими. Применение циклона более эффективно при удалении вредных веществ и пыли с нижних горизонтов, так как при циклоне закрученные против часовой стрелки внешние потоки воздуха, омывая уступы карьера, опускаются на дно, где формируется восходящий вертикальный столб воздуха. Применение антициклона более эффективно при удалении загрязнений с верхних горизонтов, так как закрученные по часовой стрелке внешние воздушные потоки, омывая уступы карьера, поднимаются с его дна, где формируется нисходящий вертикальный столб воздуха. При этом создаются все условия для поддержания движения воздушных масс по всей глубине карьера, их функционирование и регулирование и, следовательно, эффективное проветривание в зависимости от места и глубины проведения горных работ. Без раскручивания массы воздуха вдоль бортов карьера и принудительного создания управляемого восходящего (при циклоне) или нисходящего (при антициклоне) воздушного потока в центре карьера это явление невозможно. Подтверждает вышесказанное эпюра скоростей масс воздуха внутри карьера (рис. 6).

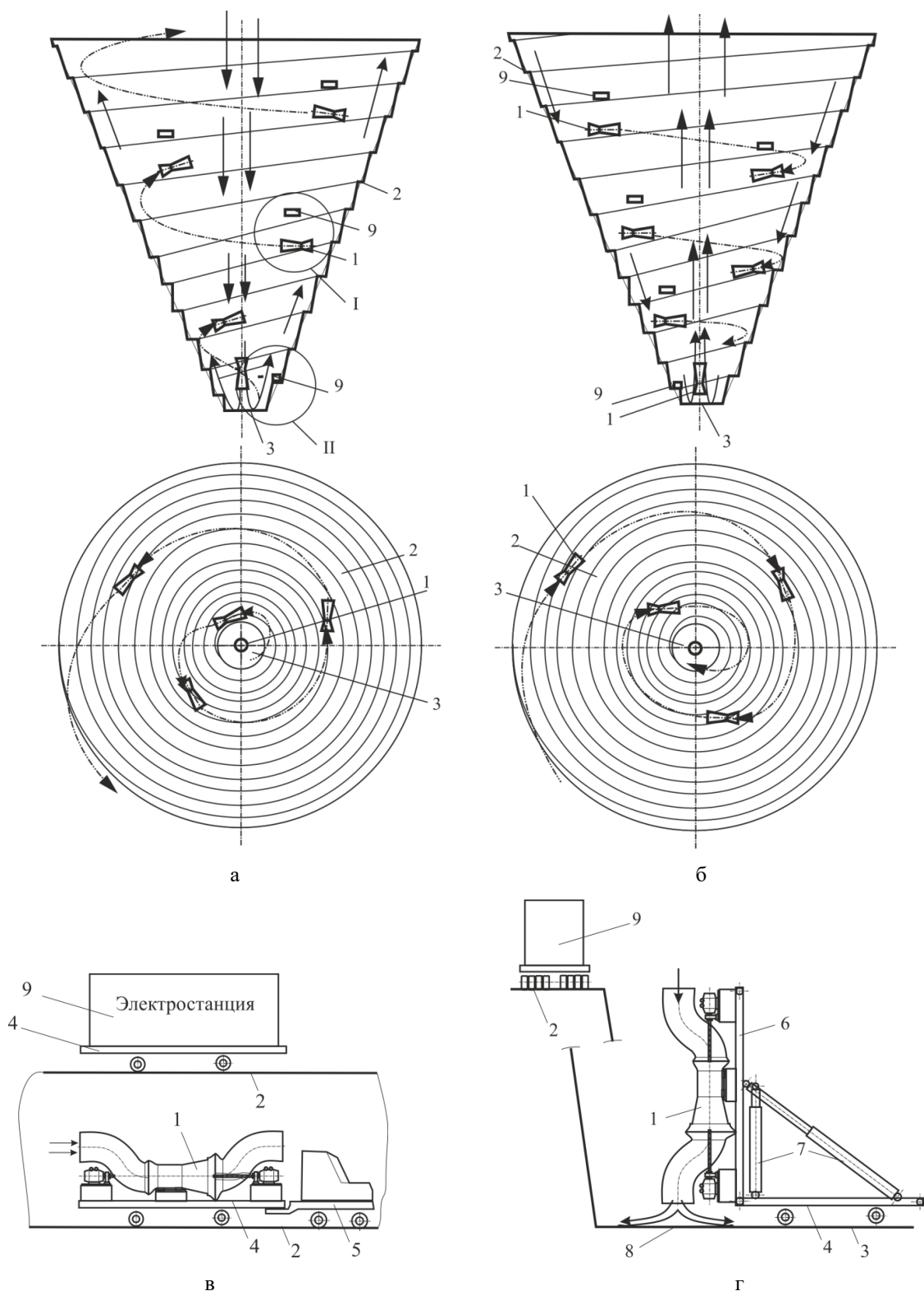


Рис. 5. Схема проветривания карьера: а – антициклон; б – циклон; в – узел I; г – узел II; 1 – вентиляционная установка; 2 – уступы; 3 – дно; 4 – прицеп; 5 – тягач; 6 – рама; 7 – подъемный механизм; 8 – постель; 9 – блок питания

Fig. 5. Open pit ventilation process flow chart: а is an anticyclone; б is a cyclone; в is unit I; г is unit II; 1 is a ventilation unit; 2 is benches; 3 is a bottom; 4 is a trailer; 5 is a traction engine; 6 is a frame; 7 is lifting mechanism; 8 is a bed; 9 is a power supply unit

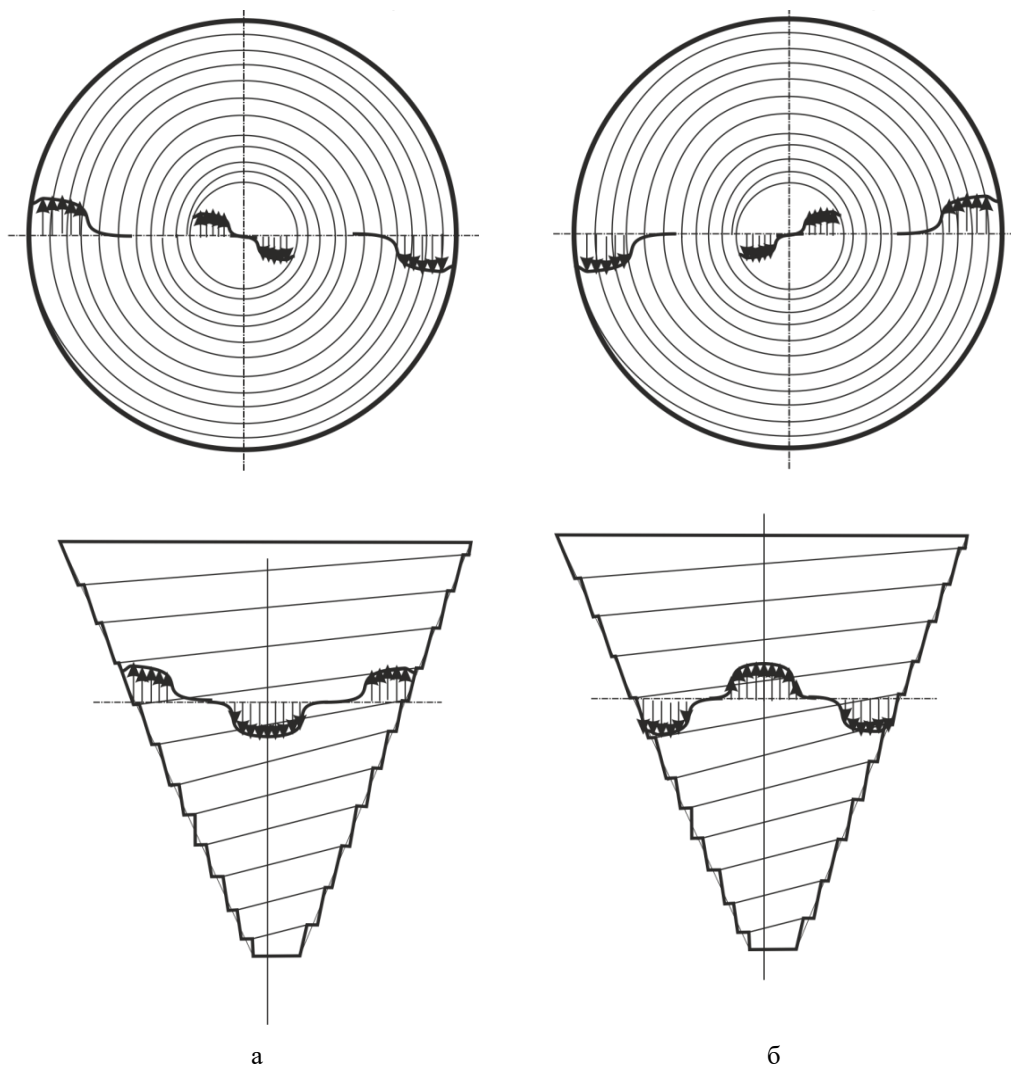


Рис. 6. Эпюры скоростей масс воздуха внутри карьера: а – при антициклоне; б – при циклоне
Fig. 6. Air mass flow velocity curve inside the open pit: a is for the anticyclone; б is for the cyclone

То есть раскручивание только внешних слоев воздуха вдоль бортов карьера или центрального вертикального столба воздуха для приведения в движение массы воздуха внутри карьера недостаточно для его вентиляции и эффективного проветривания. При этом видно, что направление движения воздушных масс имеет существенное значение. Количество вентиляционных установок (по одному или по несколько в одной точке), частоту их установки на бортах и тип вентиляционных установок заранее предусмотреть нет возможности, так как на это влияет множество факторов даже внутри одного и того же карьера. Их количество и мощность варьируют на основании экспериментальных исследований. Однако составить предварительный прогноз можно используя методы компьютерного проектирования [18-20].

Заключение

Исследование эффективности способа производились с использованием системного моделирования ANSYS. Данный программный продукт позволяет учитывать взаимодействие между естественными воздушными потоками и локальными искусственными потоками, создаваемыми работой вентиляционных установок, а также микроклимат в атмосфере карьеров, а именно температуру воздуха, его влажность, ветровые потоки, сезонные климатические условия (рис. 7). Для моделирования аэродинамики карьера и построения полей воздушного потока были использованы значения, соответствующие характеристикам промышленных вентиляционных установок.

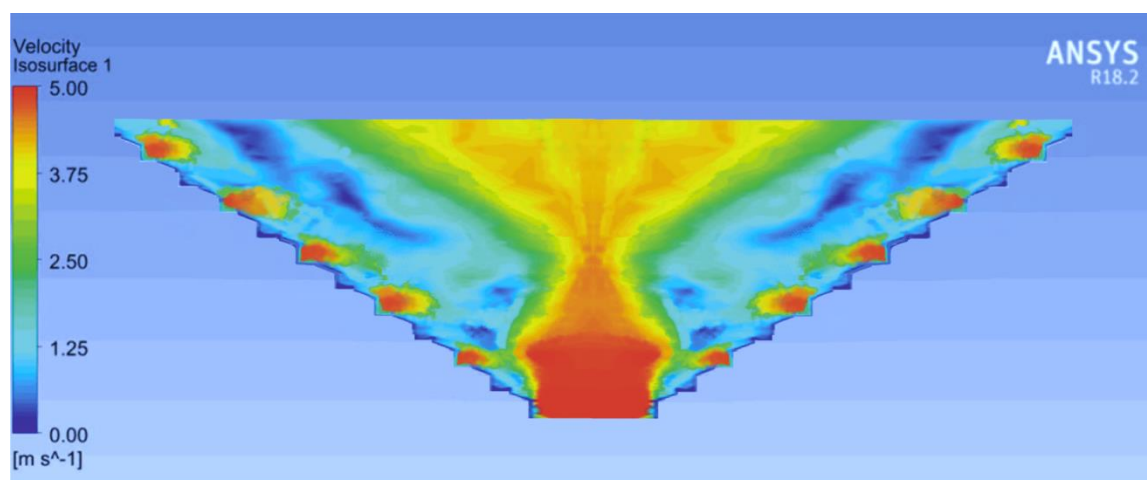


Рис. 7. Распределение скоростей воздушного потока в карьерном пространстве

Fig. 7. Distribution of air flow velocities in the open pit

Как показали расчеты, наиболее эффективными являются установки, такие как ВДН-21 и ДН-21, со следующими характеристиками: производительность 135 тыс. м³/ч, потребляемая мощность 400 кВт, полное давление (разрежение) 7200 Па, частота вращения двигателя 1000 об/мин, температурный интервал окружающего воздуха при эксплуатации -30...+40°C. Причем данные установки размещались на дне карьера, способствуя созданию циклона и антициклона. Характеристики установок, используемых для создания направленного воздушного потока вдоль бортов карьера, соответствовали параметрам установок местного проветривания и варьировались в широком диапазоне значений: начальный расход воздуха от 125 до 3770 м³/с, потребляемая мощность от 1000 до 1200 кВт, дальность струи до 1300 м, расход воздуха в конце активного участка струи до 80000 м²/с. Причем данные установки с турбореактивным двигателем монтируются на базе автомобиля и могут быть перемещены на наиболее востребованный участок.

Из рис. 7 можно сделать вывод, что использование разработанного способа проветривания [16] позволит даже при неблагоприятных метеорологических условиях ликвидировать образование застойных зон, создать атмосферу в карьере, соответствующую требованиям правил безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом, исключит вынужденные простои карьеров вследствие превышения ПДК, снизит экономический ущерб и улучшит экологический климат как внутри, так и вблизи карьера.

Список источников

1. Стась Г.В., Сарычев В.И., Пушкарев А.Е. Обеспечение безопасных условий труда при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2012. Вып. 1. Ч. 2. С. 188-198.
2. Технология и безопасность взрывных работ / Вохмин С.А., Курчин Г.С., Кирсанов А.К. и др. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. 216 с.
3. Шувалов Ю.В., Мохамад Асад, Бульбашев А.П. Атмосферные выбросы вредных веществ при открытой добыче полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. №11. С. 46-49.
4. Конорев М.М., Нестеренко Г.Ф. Вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров. Екатеринбург, 2000. 312 с.
5. Sergey G. Shakhrai, Georgii S. Kurchin, Aleksandr G. Sorokin. New technical solutions for ventilation in deep quarries // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 240. P. 654-659.
6. Конорев М.М., Нестеренко Г.Ф. Обоснование выбора схем проветривания и режимов работы систем вентиляции карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. №4. С. 73-76.
7. Конорев М.М. К вопросу вентиляции и пылегазоподавления в атмосфере карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. №51. С. 107-126.
8. Shizhai Zhang. Experimental study on performance of contra-rotating axial flow fan // International Journal of Coal Science & Technology. September 2015. Vol. 2. Issue 3. P. 232-236.
9. Козырев С.А., Амосов П.В. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2014. Т. 17. №2. С. 231-237.
10. Способы проветривания карьеров / Тимофеева Ю.В., Суксова С.А., Долкан А.А., Попов Е.В. // Вестник

- Евразийской науки. 2020. №6. Т. 12. <https://esj.today/issue-6-2020.html>.
11. Морин А.С. Роль методов искусственного проветривания в комплексе мероприятий по управлению пылегазовым режимом карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2007. №1. С. 24-28.
 12. Шахрай С.Г., Курчин Г.С., Сорокин А.Г. Экспериментальное исследование эффективности естественного проветривания карьера через трубопроводы // Известия вузов. Горный журнал. 2019. №1. С. 133.
 13. Пат. 2733542 Российская Федерация, МПК E21F1/00. Способ проветривания карьера / Ковлеков И.И.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова». № 2020122853; заявл. 10.07.2020; опубл. 20.10.2020.
 14. А.с. SU1122831, МПК E21F1/00. Способ проветривания карьера / Бордий А.П., Верба Ю.В., Кижло Л.А.; заявитель «Днепропетровский филиал всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института горнорудного машиностроения». № 3489899/22-03; заявл. 07.09.1982; опубл. 07.11.1984.
 15. Пат. 2164602 Российская Федерация, МПК E21F1/00. Способ проветривания глубоких карьеров / Морин А.С., Буткин В.Д.; заявитель и патентообладатель «Красноярская государственная академия цветных металлов и золота». № 99110111; заявл. 12.05.1999; опубл. 27.03.2001.
 16. Пат. 2172839 Российская Федерация, МПК E21F1/00. Способ искусственной вентиляции глубоких карьеров / Морин А.С., Буткин В.Д.; заявитель и патентообладатель Красноярская государственная академия цветных металлов и золота. № 2000111294; заявл. 06.05.2000; опубл. 27.08.2001.
 17. Пат. 2765698 Российская Федерация, МПК E21F1/00. Способ проветривания карьеров / Сергеев В.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)». № 2021121149; заявл. 16.07.2021; опубл. 02.02.2022.
 18. Козырев С.А., Осинцева А.В., Амосов П.В. Управление вентиляционными потоками в горных выработках подземных рудников на основе математического моделирования аэродинамических процессов. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2019. 114 с.
 19. Амосов П.В., Козырев С.А., Назарчук О.В. Исследование влияния теплового фактора на аэродинамические параметры атмосферы карьера на основе трехмерного компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. №S37. С. 322-332.
 20. Амосов П.В., Козырев С.А., Назарчук О.В. Разработка компьютерной модели аэротермодинамики атмосферы карьера в ANSYS FLUENT // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018. №44(70). С. 121-125.
 21. Назарчук О.В., Амосов П.В., Козырев С.А. Моделирование аэродинамики атмосферы карьера в ANSYS FLUENT // Проблемы арктического региона: труды XVI Международной научной конференции студентов и аспирантов. Мурманск, 2017. С. 82-86.

References

1. Stas G.V., Sarychev V.I., Pushkarev A.E. Providing safety when mineral field development by open-cut method. *Izvestiya TulGU. Estestvennye nauki* [Bulletin of Tula State University. Natural Sciences], 2012, issue 1, part 2, pp. 188-198. (In Russ.)
2. Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Kirsanov A.K. et al. *Tekhnologiya i bezopasnost vzryvnykh работ* [Technology and safety of blasting]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2022, 216 p. (In Russ.)
3. Shuvalov Yu.V., Mohamad Asad, Bulbashev A.P. Atmospheric emissions of harmful substances during open pit mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2000, no. 11, pp. 46-49. (In Russ.)
4. Konorev M.M., Nesterenko G.F. *Ventilyatsiya i pylgazopodavleniye v atmosfere karerov* [Ventilation and dust and gas suppression in atmosphere of quarries]. Yekaterinburg, 2000, 312 p. (In Russ.)
5. Shakhrai S.G., Kurchin G.S., Sorokin A.G. New technical solutions for ventilation in deep quarries. *Journal of Mining Institute*, 2019, 240, 654-659.
6. Konorev M.M., Nesterenko G.F. Rationale for choosing ventilation process flow charts and operation modes of open pit ventilation systems. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2002, no. 4, pp. 73-76. (In Russ.)
7. Konorev M.M. Ventilation and dust and gas suppression in atmosphere of quarries. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2006, no. S1, pp. 107-126. (In Russ.)
8. Shizhai Zhang. Experimental study on performance of contra-rotating axial flow fan. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2015, 2 (3), 232-236.
9. Kozыrev S.A., Amosov P.V. Ways of atmosphere normalization of deep open-pits. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Murmansk State Technical University], 2014, vol. 17, no. 2, pp. 231-237. (In Russ.)
10. 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. Available at: <https://esj.today/PDF/79NZVN620.pdf>.
11. Morin A.S. The role of forced ventilation methods in a set of measures to control dust and gas conditions in open pits. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Education Institutions. Mining Journal], 2007, no. 1, pp. 24-28. (In Russ.)

12. Shakhrai S.G., Kurchin G.S., Sorokin A.G. Experimental study on efficiency of open pit natural ventilation through pipelines. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Education Institutions. Mining Journal], 2019, no. 1, pp. 127-133. (In Russ.)
13. Kovlekov I.I. *Sposob provetrivaniya karera* [The method of ventilation of a quarry]. Patent RU, no. 2733542, 2020.
14. Bordiy A.P., Verba Yu.V., Kizhlo L.A. *Sposob provetrivaniya karera* [The method of ventilation of a quarry]. Author's certificate SU, no. 1122831, 1984.
15. Morin A.S., Butkin V.D. *Sposob provetrivaniya glubokikh karerov* [The method of ventilation of deep quarries]. Patent RU, no. 2164602, 2001.
16. Morin A.S., Butkin V.D. *Sposob iskusstvennoy ventilyatsii glubokikh karerov* [The method of forced ventilation of deep quarries]. Patent RU, no. 2172839, 2001.
17. Sergeev V.V. *Sposob provetrivaniya karerov* [The method of ventilation of quarries]. Patent RU, no. 2765698, 2022.
18. Kozyrev S.A., Osintseva A.V., Amosov P.V. *Upravlenie ventilyatsionnymi potokami v gornykh vyrabotkakh podzemnykh rudnikov na osnove matematicheskogo modelirovaniya aerodinamicheskikh protsessov* [Control of ventilation flows in underground mine workings applying a mathematical simulation of aerodynamic processes]. Apatity: Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 2019, 114 p. (In Russ.)
19. Amosov P.V., Kozyrev S.A., Nazarchuk O.V. Study on the influence of the thermal factor on the aerodynamic parameters of atmosphere of a quarry based on a three-dimensional computer simulation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2019, no. S37, pp. 322-332. (In Russ.)
20. Amosov P.V., Kozyrev S.A., Nazarchuk O.V. Development of a computer model of open pit atmosphere aerothermodynamics in ANSYS FLUENT. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2018, no. 44(70), pp. 121-125. (In Russ.)
21. Nazarchuk O.V., Amosov P.V., Kozyrev S.A. Modeling of open pit atmosphere aerodynamics in ANSYS FLUENT. *Problemy Arkticheskogo regiona. Trudy XVI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov i aspirantov* [Problems of the Arctic region. Proceedings of the 16th International Scientific Conference of Students and Postgraduates]. Murmansk, 2017, pp. 82-86. (In Russ.)

Поступила 06.07.2022; принята к публикации 08.08.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 06/07/2022; revised 08/08/2022; published 22/12/2022

Сергеев Вячеслав Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Горное дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия.

Герасименко Татьяна Евгеньевна – кандидат технических наук, начальник отдела интеллектуальной собственности, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Евдокимов Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Обогащение полезных ископаемых», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. E-mail: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

Герасименко Наталья Павловна – студентка, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия. E-mail: nata.gerasimenko.2002@mail.ru.

Vyacheslav V. Sergeev – DrSc (Eng.), Professor of the Mining Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

Tatiana E. Gerasimenko – PhD (Eng.), Head of the Intellectual Property Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Sergey I. Evdokimov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Minerals Beneficiation Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

Natalia P. Gerasimenko – student, Kuban State University, Krasnodar, Russia. Email: nata.gerasimenko.2002@mail.ru.