ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(8):38-50
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.454 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_38

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВЫХ КОМБАЙНОВЫХ ВЫРАБОТОК КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ

Г.З. Файнбург[1], А.Г. Исаевич[1], А.В. Зайцев[1]

[1] Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: aero_alex@mail.ru

Аннотация: Приведен сравнительный анализ структуры вентиляционных потоков и определяемого ими качества воздушной среды (по фактору — пыль) на рабочих местах машинистов комбайна и самоходного вагона при различных способах проветривания тупиковых комбайновых забоев калийных рудников. Показано, что существенного улучшения воздушной среды в зоне дыхания машинистов комбайна и самоходного вагона удается достигнуть в полной мере, задействовав механизмы вытеснения (поршневого или идеального переноса) воздушных потоков и организовав их превалирование над процессами перемешивания (смешения). Для операционного применения процессов вытеснения в условиях замкнутого пространства и интенсивного вихревого течения в забое предложено использовать понятия «наветренная зона» и «подветренная зона», ассоциируя их с условно «чистыми» и «грязными» микрозонами. Введение этих новых для рудничной аэрологии понятий позволяет более глубоко и детально анализировать процессы движения воздуха, определяющие его качество в зонах дыхания горнорабочих. Предложенный подход обосновывается теоретическим анализом, данными натурных наблюдений и результатами численного компьютерного моделирования двух способов проветривания тупиковых забоев – нагнетательного и всасывающего. Показано, что в тупиковых забоях калийных рудников при работе механизированного проходческо-очистного комбайнового комплекса нагнетательный способ приводит к более высоким значениям запыленности на рабочих местах машинистов комбайна и самоходного вагона, чем при использовании всасывающего способа. Тем самым всасывающий способ проветривания, пока не допущенный к применению на калийных рудниках России, имеет огромные преимущества и способен значительно повысить эффективность проветривания тупиковых горных выработок калийных рудников при работе механизированного проходческо-очистного комбайнового комплекса.

Ключевые слова: проветривание тупиковых комбайновых забоев, калийные рудники, соляная пыль, способ проветривания, комбайновый комплекс, воздушный поток, микрозонирование, численное моделирование, пылеобразование.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-77-30008.

Для цитирования: *Файнбург Г. З., Исаевич А. Г., Зайцев А. В.* Повышение эффективности проветривания тупиковых комбайновых выработок калийных рудников по пылевому фактору // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 38–50. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_38.

© Г.З. Файнбург, А.Г. Исаевич, А.В. Зайцев. 2021.

Enhancement of ventilation efficiency in blind roadways of potash mines by dust criterion

G.Z. Fainburg[1], A.G. Isaevich[1], A.V. Zaytsev[1]

[1] Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: aero_alex@mail.ru

Abstract: The ventilation airflow patterns and the resultant air quality (by the criterion of dust) at workplaces of operators of continuous miners and self-propelled cars are analyzed and compared using different ventilation methods in blind roadways of potash mines. Essential improvement of air quality in the breathing zones of operators of continuous miners and self-propelled cars is possible with prevailing application of displacement ventilation mechanism (piston principle or ideal air flow) over the mixing ventilation mechanism. For the displacement ventilation mechanism in an enclosed space and to ensure an intense eddy flow in the face area, it is proposed to use the notions of upwind and downwind zones as conditionally clean and dirty micro-zones, respectively. Introduction of these notions, new in mine aerology, enables a deeper analysis of the air flow processes which define the air quality in the miners' breathing zones. The proposed approach is based on the theoretical studies, field studies and computer-aided numerical modeling of two ventilation methods in blind faces—blowing and suction ventilation. In blind roadways of potash mines using continuous mining machines, blowing ventilation induces dustiness at workplaces of operators of continuous miners and self-propelled cars as against the suction method of airing. Thereby, suction ventilation, which is yet unapplied in potash mines in Russia, has great advantages and can essentially improve ventilation efficiency in blind roadways in potash mining using continuous mining machines.

Key words: ventilation of blind roadways with continuous miners, potash mine, dust salt, ventilation method, continuous mining machine chain, air flow, micro-zoning, numerical modeling, dust generation.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-77-30008.

For citation: Fainburg G. Z., Isaevich A. G., Zaytsev A. V. Enhancement of ventilation efficiency in blind roadways of potash mines by dust criterion. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(8):38-50. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_38.

Введение

Проходка выработки тупиковым забоем является неотъемлемой частью любой технологии добычи полезных ископаемых и одновременно представляет собой самый сложный объект проветривания, для которого пространственный «тупик» для движения воздуха необходимо преобразовать в сквозной аэродинамический канал. Современные способы такого преобразования разнообразны и с формальной точки зрения равноправны: либо сначала воздух подается по специальному оборудованию — чаще всего по вентиляционному ставу, а затем воздушный поток движется по горной выработке, либо наоборот, сначала воздушный поток движется по горной выработке, а затем удаляется по вентиляционному ставу.

С организационной точки эти два способа преобразования тупикового за-

боя в сквозной аэродинамический канал также могут быть приведены к одинаковым затратам труда горнорабочих, однако существенные физические различия струйного течения при нагнетательном способе проветривания и «воронкообразного» течения при всасывающем проветривании делают эти два способа принципиально различными с точки зрения аэродинамики воздушного потока в призабойной части выработки. В случае нагнетательного способа проветривания активная струя, выходящая из конца вентиляционного става в проветриваемую тупиковую выработку, имеет большую кинетическую энергию и оказывается способна распространяться на расстояние от одного до двух десятков метров от выхлопа вентиляционного става, приводит к сильной турбулизации воздушных потоков в тупиковом забое [1, 2]. В то время как при всасывающем способе проветривания воздушная струя, двигающаяся по тупиковой горной выработке, обладает сравнительно меньшей кинетической энергией, вследствие чего ей относительно просто изменить направление своего движения, а траектория ее движения до всаса вентиляционного става чаще всего не достигает груди забоя и не задерживается в крупномасштабных циркулирующих вихрях, за счет чего оказывается короче, чем при нагнетательном способе проветривания.

Это в итоге предопределяет различия двух указанных способов в эффективности проветривания. В первую очередь эти различия связаны с количеством свежего воздуха, необходимого для проветривания пространства тупиковой горной выработки и разбавления выделяющихся вредных примесей, со временем достижения нормативного состояния рудничной атмосферы.

Задача данной статьи заключается в анализе двух указанных классических способов проветривания тупиковых забоев с помощью вентиляционного става (нагнетательного и всасывающего) с точки зрения их применимости для борьбы с высокими концентрациями соляной пыли, выделяющейся при работе комбайновых комплексов в тупиковых выработках калийных рудников.

Качественный анализ времени выноса вредных примесей

Пусть в воздушном пространстве тупикового забоя появился и находится некоторый меньший объем загрязненного воздуха. Для его вытеснения (в предположении о действии механизма идеального вытеснения без какого-либо смешения загрязненного воздуха с более чистым воздухом) необходим определенный объем свежего воздуха $V = Q \cdot t$ (м^3). При объемном расходе свежего воздуха Q (м^3/с) через некоторое время t (с) загрязненный воздух полностью заместится свежим воздухом с допустимой концентрацией загрязнения $C_д$ (мг/м^3). Это время t является минимальным для любых реальных процессов проветривания. Однако на практике вышеописанная ситуация идеального вытеснения не наблюдается из-за процессов конвективно-диффузионного перемешивания более загрязненного воздуха с менее загрязненным. Можно рассмотреть случай идеального перемешивания, когда объем загрязненного воздуха в процессе взаимодействия с объемом более чистого воздуха успевает перемешаться до однородного состояния в объеме горной выработки. Из закона сохранения массы можно получить результирующую концентрацию и время достижения допустимой концентрацией загрязнения $C_д$. Это время будет равно:

$$t = \frac{V}{Q} \ln \frac{C_0}{C_д} \qquad (1)$$

Эта величина больше времени проветривания горной выработки при действии только механизма идеального вытеснения (при условии, если начальная концентрация вредной примеси была в 3 и более раз выше соответствующей допустимой концентрации [3]). C_0 (мг/м^3) — начальная концентрация вредной примеси в горной выработке.

Таким образом, если рассматривать процесс вытеснения запыленного воздуха с учетом идеального перемешивания, то можно заметить, что за счет вытеснения большего загрязненного объема понадобится больше времени и чем больше степень загрязнения воздуха, тем большее время проветривания нужно для достижения тех или иных норм при учете процесса смешения. Иначе говоря, вышеприведенный анализ однозначно показывает, что процессы перемешивания увеличивают объемы загрязненного воздуха до объема всей проветриваемой области и тем самым время проветривания до допустимых концентраций увеличивается. Следовательно, процессы идеального вытеснения более эффективные и ресурсосберегающие.

Исследование запыленности выработок калийных рудников и способы ее снижения

Многолетняя практика проветривания калийных рудников России и Беларуси показывает, что концентрации пыли в тупиковом забое при комбайновой проходке могут достигать величины 5000 мг/м^3, что в тысячу раз превышает предельно допустимый уровень 5,0 мг/м^3 [4, 5]. Тогда либо время достижения этого состояния при подаче фиксированного количества свежего воздуха многократно увеличится, либо надо увеличивать расход подаваемого воздуха до значительных величин, что технически сложно и энергетически чрезмерно затратно.

В сложившейся практике расчет количества воздуха Q_0, потребного для проветривания рабочей зоны по фактору вредных примесей, определяется для строго стационарного случая по формуле:

$$C_д = \frac{g^* C^* + Q_0 C_0}{g^* + Q_0} \qquad (2)$$

где $C_д$ (мг/м^3) — предельно допустимая концентрация; g^* (м^3/с) — условная мощность выделения загрязнения (вредности); C^* (мг/м^3) — условная концентрация поступающей в воздушный поток вредности; C_0 (мг/м^3) — некоторая малая концентрация вредных примесей во входной струе воздуха.

В формуле (2) нет различия по способу проветривания и реальным микроцикличным процессам отбойки-погрузки калийной руды, что сильно «маскирует» сущность процессов проветривания в тупиковом забое, ведет к существенному завышению расчетных значений расхода воздуха над реально необходимыми.

Основной принцип формулы (2) заключается в том, что надо разбавлять (разжижать) вредности до предельно допустимой концентрации, размешивая их более загрязненные объемы воздуха с менее загрязненными объемами. Такая процедура требует все больших объемов свежего чистого воздуха и непрерывно его загрязняет. Нормализация пылевой обстановки становится крайне сложной и, несмотря на значительное количество работ в данной области [6—8], практически невыполнимой задачей.

Совершенно другая обстановка складывается в тупиковом комбайновом забое. В нем зоны дыхания горнорабочих, связанные с их рабочими местами у пультов управления, не совпадают с местами интенсивного пылеобразования. Соляная пыль калийных рудников является гигроскопической и на молекулярном уровне притягивает влагу воздуха, агрегируется, выпадает и образуют

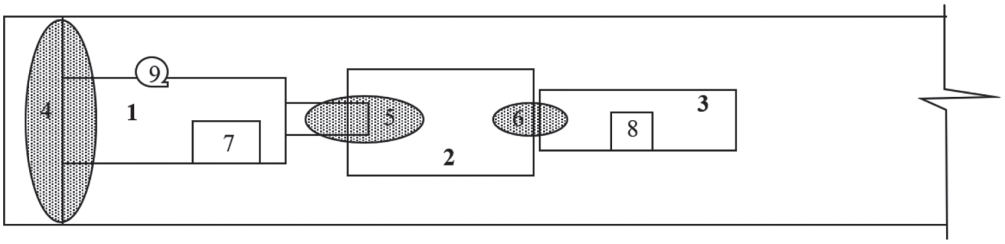

Рис. 1. Схема расположения оборудования: комбайн (1), бункер-перегружатель (2), самоходный вагон (3); мест основного пылеобразования: отбойка руды в защитовом пространстве (4), пересып отбитой горной массы со стрелы комбайна в бункер-перегружатель (5), пересып горной массы из бункера-перегружателя в самоходный вагон (6); рабочих мест: машиниста-оператора комбайнового комплекса (7) и машиниста самоходного вагона (8), а также вентилятора пылеотсоса (9), существенно определяющего пылевую обстановку в забое

Fig. 1. Equipment layout: continuous miner (1), loading bunker (2), self-propelled car (3); major dust production layout: ore breaking behind the shield (4), flow of crushed rocks from continuous miner beam to loading bunker (5), flow of crushed rocks from loading bunker to self-propelled car (6); workplace layout: continuous miner operator site (7), self-propelled car operator site (8), dust extraction fan (9) which conditions dust content of air in face area

мягкую, но связанную рыхлую соленую «подушку», довольно прочно сцепленную с поверхностями осаждения. Взметывания пыли воздушным потоком не наблюдается. Поэтому основным местом пылеобразования является защитовое пространство, где происходит отбойка руды, и даже ее переизмельчение, ведущее к образованию пыли. Щит существенно ограничивает распространение пыли в призабойном пространстве, а вентилятор пылеотсоса создает под щитом небольшое разрешение, усиливающее локализацию пыли за щитом. Вместе с тем, вращение режущих органов оказывает на воздух действие «мешалки» и «пропеллера» одновременно, циклически создавая повышенное давление перед ними, что проявляется в образовании «протуберанцев» — языков пыли, выскакивающих изо всех небольших, но имеющихся щелей, особенно у кровли на оси симметрии арочной выработки [9].

Двумя другими местами пылеобразования, по мере снижения интенсивности, являются, во-первых, пересып отбитой горной массы со стрелы конвейера комбайна в бункер-перегружатель, и, во-вторых, пересып со стрелы бункера-перегружателя в самоходный вагон (см. рис. 1).

Образование пыли, точнее переход ее из «концентрированного» состояния типа «порошок» во взвешенное состояние, связано здесь в основном с ударом летящей вниз под силой тяжести пересыпаемой руды, рудной мелочи и находящейся в них пыли об дно соответствующего оборудования, при котором стремительно вытесняемый объем воздуха подхватывает пылинки, попадающие затем под воздействие воздушных потоков, практически перпендикулярно «пронзающих» падающую запыленную «струю» пересыпаемой горной массы.

Стоит отметить, что соляная пыль калийных рудников негорюча, а потому не взрывается, и даже обладает свойствами гасить пламя. Поэтому ее «опасность» проявляется не в области безопасности ведения горных работ [20], а в области охраны труда (гигиены труда), занятой защитой органов дыхания горнорабочих от вредного влияния образующейся в процессе отбойки руды соляной пыли. Это существенное обстоятельство дает возможность рассматривать в качестве объекта проветривания не весь объем

выработки, как это принято в классических подходах к расчету и организации проветривания, а только «зону дыхания», т.е. условную сферу размером 0,5 м вокруг рта и носа человека.

Пространственное различие мест пылеобразования и мест «воздухопотребления» рабочими объективно позволяет разделить потоки пыли и свежего воздуха на основе предложенных нами ранее принципов и микрозонирования [2] и тем самым существенно повысить эффективность проветривания.

На рис. 1 хорошо видно, что различное расположение мест пылеобразования и зон дыхания горнорабочих в пространстве тупиковой комбайновой выработки позволяет организовать структуру микроциркуляционных воздушных потоков пылегазовой смеси так, чтобы рабочие места и соответствующие зоны дыхания не оказались «подветренными» на пути пылевых «потоков». Таким способом является размещение всаса воздуха в правом ближнем к щиту углу (практически по диагонали с рабочим местом машиниста комбайна), т.е. организация всасывающего проветривания [10].

Теоретическое исследование различных способов проветривания тупиковой выработки

Принцип микрозонирования подразумевает необходимость детального анализа распределения вредных примесей в объеме горной выработки, который не может быть выполнен в рамках описанных ранее классических моделей идеального вытеснения и перемешивания, поскольку данные модели оперируют интегральными характеристиками вредных примесей в тупиковой горной выработке. Более детальное рассмотрение вопросов выбора способов проветривания тупиковой выработки по фактору пыли при работе механизированного проходческо-очистного комбайнового комплекса может быть сделано посредством трехмерного численного моделирования динамики пылевоздушной смеси.

Возникшее в XX в. научное обоснование применения нагнетательного и всасывающего способов проветривания или их комбинаций потребовало простейших аналитических моделей, в рамках которых делаемые предположения лишь жестче закрепили невольную идею о «пустоте» забоя и о проветривании «всей» горной выработки. В XXI в., тупиковый «забой» — не пустое пространство, он занят огромным механизированным комплексом, в котором рабочее место его операторов относительно жестко определено и зафиксировано. Следовательно, технология ушла вперед, а организация проветривания, регламентируемая правилами безопасности, осталась на уровне прошлого века, прошлых технологий, связанных с буровзрывной отбойкой руды и соответствующих методов ее логистики.

В частности, приказом Ростехнадзора от 21.11.2018 № 580 в п. 207 Требований безопасности к разработке месторождений калийно-магниевой и каменной солей Правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых (утв. приказом Ростехнадзора от 11 декабря 2013 г. № 599) был введен абзац: «При проходке выработок комбайновыми комплексами проветривание должно осуществляться нагнетательным или комбинированным способами. При комбинированном способе проветривания нагнетательный способ является основным…».

Более того, фактически нет разрешения использовать всасывающий способ проветривания и в других (отличных от калия) рудных шахтах, поскольку совокупность всех требований «Правил безопасности…» по организации про-

ветривания тупиковых забоев не позволяют проветривать тупиковые забои никаким иным способом, кроме нагнетательного.

Как уже было сказано выше, зоны дыхания горнорабочих и источники пылевыделения разнесены в пространстве тупикового забоя, и размещение всаса воздуха в правом ближнем к щиту углу должно позволить минимизировать концентрацию пыли в зоне дыхания машиниста комбайна. Для подтверждения данного предположения необходимо оценить структуру воздушных потоков в пространстве тупикового забоя, что затруднительно сделать в рамках моделей идеального вытеснения и перемешивания. Данную задачу можно решить способами численного моделирования. В рамках вычислительного эксперимента — трехмерного приближенного к реальности моделирования турбулентного тепломассопереноса. В современной литературе представлено множество работ, связанных с применением методов CFD для решения задач рудничной вентиляции [11—15]. В нашем случае для расчетов использован специализированный программный пакет ANSYS Fluent. Моделирование производилось совместно с сотрудниками лаборатории вычислительной гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН. При моделировании также использовались данные [21].

В модели использовалась стандартная двухпараметрическая модель турбулентности standard k-ε с масштабируемой пристеночной функцией. После проведения серии тестовых расчетов было выбрано разбиение расчетной области на 3,8 млн элементов со сгущением вблизи твердых поверхностей для корректного моделирования высоких градиентов скорости воздушного потока в тонком пограничном слое. Параметры расчетной модели подбирали максимально близко к реальным параметрам действующей выработки калийного рудника: сечение тупиковой выработки — арочное, площадь сечения 17 м^2, длина выработки — 50 м; воздуховод находится с левой стороны, диаметр воздуховода — 0,6 м, скорость воздушной струи на выходе из воздуховода — 10 м/с, расстояние между кабиной машиниста и концом воздуховода — 20 м (рис. 2).

Анализ движения пыли производится посредством визуализации линий тока частиц запыленного воздушного потока, отмеченных некоторым «маркером» — в этом случае движение пыли хорошо визуализирует структуру воз-

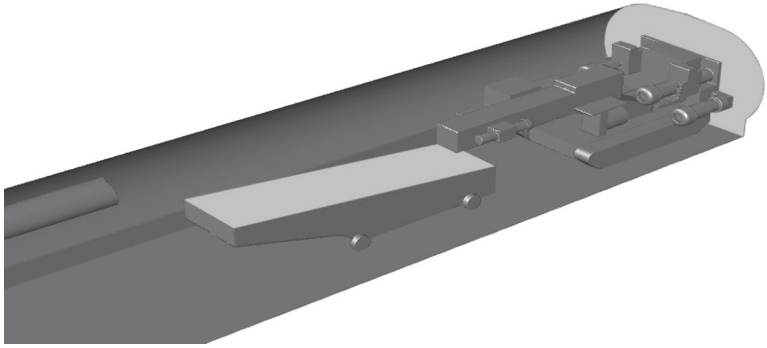

Рис. 2. Геометрическая модель проветриваемой тупиковой выработки, комбайна и бункера перегружателя

Fig. 2. Geometrical model of ventilation-equipped blind roadway, continuous miner and loading bunker

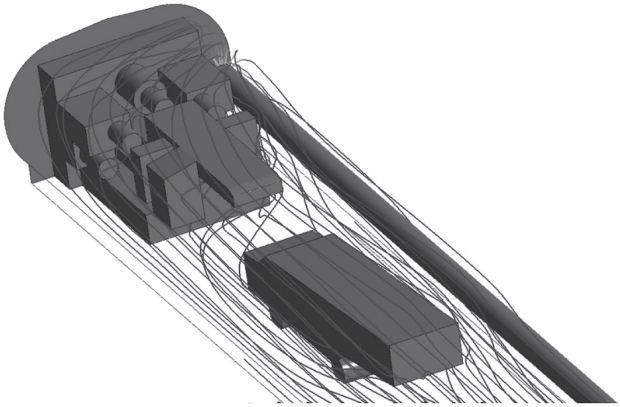

Рис. 4. Рассчитанные линии тока при всасывающем способе проветривания
Fig. 4. Calculated air flow lines in suction ventilation

душных потоков. Облегчается выявление типичных структур и их динамики в общей массе стохастически меняющегося турбулентного поля скоростей и неравномерной цикличности отбойки руды, что определяет изменчивость источников пылеобразования и процессов проветривания [16—19].

Общая картина движения воздушных потоков в призабойной зоне, определяемая в основном законом сохранения массы в виде уравнения неразрывности, предопределила при нагнетательном способе проветривания сохранения вихревого движения. При этом основной вихрь располагался в пространстве между комбайновым комплексом и кровлей выработки. Можно увидеть, что он проходит через рабочее место машиниста комбайна. Так, движение воздуха в образовавшемся вихре, достигнув шита и вобрав там часть пыли, возвращается к началу своего зарождения у става нагнетательного вентиляционного трубопровода. При этом часть потоков вихря проходит через область пересыпа отбитой руды и переизмельченной рудной просыпи со стрелы комбайна в бункер перегружатель (рис. 3, см. Приложение, с. 50), являющийся областью интенсивного пылеобразования.

При всасывающем способе проветривания вместо тканевого фильтра на вентилятор пылеотсоса надевается вентиляционный став, второй конец которого выводится на выемочный (вентиляционный) штрек. За счет разряжения, создаваемого вентилятором-пылеотсосом, свежий воздух будет поступать в тупиковую выработку, одновременно прижимая выделяющуюся из-за щита пыль к щиту. Грязный воздух будет удаляться по вентиляционному ставу. Концентрации пыли в нем могут значительно превосходить ПДК.

На рис. 4 представлены результаты моделирования проветривания комбайнового комплекса с использованием штатного вентилятора пылеотсоса — линии тока воздуха.

Данная схема проветривания обладает рядом преимуществ перед нагнетательной схемой. Прежде всего, все вредности, выделяемые в процессе разрушения массива горных пород исполнительным органом комбайна, локализованы внутри вентиляционного става, что позволяет машинисту самоходного вагона, транспортирующего полезное ископаемое до рудоспуска, постоянно находиться на свежей струе. В этом случае гарантировано улучшаются условия

труда машиниста самоходного вагона, кабина машиниста комбайна также оказывается в зоне движения свежей струи. Еще одним положительным фактором данной схемы проветривания является то, что в отличие от нагнетательного способа не происходит образования вихря, который возвращает вредности в зону дыхания машиниста комбайна.

Однако все вышеизложенное не предотвращает процесс пыления во время загрузки руды в бункер-перегружатель. Поскольку вентилятор пылеотсоса расположен максимально близко к забою выработки, он не может полностью обеспечить забор загрязненного воздуха из зоны загрузки бункера перегружателя. Этот вопрос можно решить модернизацией зоны всаса с организацией двух мест забора запыленного воздуха.

В дискуссиях о способах проветривания одним из аргументов против всасывающего способа проветривания приводится довод о возможности возникновения застойных зон при всасывающем способе проветривания. Однако при этом не учитывается, что на современных добычных комбайнах все электродвигатели оборудованы системами воздушного охлаждения, которые турбулизируют локальные области призабойного пространства. В связи с этим возникновения застойных зон принципиально быть не может.

На рис. 5 (см. Приложение, с. 50) представлены результаты моделирования с учетом воздушных потоков, создаваемых системой охлаждения электродвигателей.

На рис. 5 отчетливо видны микровихри, образующиеся под влиянием вентиляторов системы охлаждения. Стоит отметить, что при нагнетательном способе влияние воздушных потоков, образующихся вследствие работы системы охлаждения, выражено слабо ввиду того, что поток и так достаточно сильно турбулизован вследствие высокоскоростной струи воздуха, выходящей из вентиляционного става. При всасывающем же способе проветривания они играют весьма существенную роль.

Заключение

Таким образом, использование численного эксперимента позволяет объективно сравнивать различные способы проветривания тупиковых выработок, отрабатываемых комбайновыми комплексами. Это, в свою очередь, дает основание для начала работы над изменением принципов и подходов к проветриванию тупиковых комбайновых проходческо-очистных забоев соляных и калийных рудников в сторону расширения возможных (законодательно разрешенных) способов проветривания, так как всасывающий способ, запрещенный сегодня к применению, обладает массой существенных достоинств перед нагнетательным. Так, при нагнетательном проветривании соляная пыль оказывается рассредоточенной по всему свободному объему выработки, где сохраняется в витающем состоянии, а, осев, поднимается движущимся вагоном, то при всасывающем проветривании пыль быстро оказывается в стесненном пространстве вентиляционного трубопровода, где из-за своей очень высокой концентрации частично агрегируется.

Все это резко улучшает пылевую обстановку не только на рабочих местах горно-рабочих, но и в целом. На рабочем месте машиниста самоходного вагона концентрация пыли при всасывающем способе равна фоновой, либо незначительно ее превышает. Его условия труда существенно улучшаются. Такой же пылевая обстановка будет и на рабочем месте машиниста комбайна при нулевой подаче комбайна на забой. Все это свидетельствует о том, что всасывающий

способ позволяет существенно улучшить условия труда рабочих для комбайновых забоев по сравнению с нагнетательным.

Все это в комплексе с результатами численного моделирования дает основание для поведения натурного эксперимента в условиях действующего рудника. Положительные результаты натурного эксперимента, в свою очередь, позволят говорить о необходимости внесения изменений в действующие нормативные документы, оптимизировать проветривание тупиковых комбайновых забоев, тем самым открывая дорогу повышению производительности, и снизить вентиляционную нагрузку на проветривание выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Колесниченко Е. А.*, *Артемьев В. Б.*, *Колесниченко И. Е.*, *Любомищенко Е. И.* Влияние длины тупиковой выработки и режима вентиляции на концентрацию метана в забое // Горная промышленность. — 2010. — № 3. — С. 26—30.

2. *Файнбург Г. З.*, *Исаевич А. Г.* Анализ микроциркуляционных потоков между микрозонами в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3. — С. 58—73. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-58-73.

3. *Файнбург Г. З.*, *Семин М. А.*, *Исаевич А. Г.* Взаимосвязь физических механизмов, математических моделей и технических способов проветривания тупиковых горных выработок // Горное эхо. — 2020. — № 3. — С. 123—128.

4. *Медведев И. И.* Проветривание калийных рудников. — М.: Недра, 1970.

5. *Медведев И. И.*, *Красноштейн А. Е.* Борьба с пылью на калийных рудниках. — М.: Недра, 1977.

6. *Романченко С. Б.* Управление аэропылединамическими процессами при подземной угледобыче // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 298—333.

7. *Ивочкин А., Панюк В., Саргаева М., Долгая Ю., Целуев Е.* Запыленность рудничного воздуха и меры борьбы с угольной и породной пылью // Энергонадзор. — 2015. — № 9(73). — С. 40.

8. *Дрёмов А. В.* Обоснование рациональных параметров обеспыливания в комбайновом проходческом забое. Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. — М.: МГГУ, 2010.

9. *Левин Л. Ю.*, *Исаевич А. Г.*, *Семин М. А.*, *Газизуллин Р. Р.* Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горный журнал. — 2015. — № 1. — С. 72–75.

10. *Файнбург Г. З.*, *Овсянкин А. Д.*, *Вайсман О. Я.*, *Шалаев С. В.* Опыт применения всасывающего способа проветривания комбайновых выработок на Верхнекамских калийных рудниках / Совершенствование разработки соляных месторождений: межвузовский сборник научных трудов. — Пермь: Пермский политех. институт, 1990. — С. 122—127.

11. *Xu G., Luxbacher K., Ragab S., Xu J., Ding X.* Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2016, vol. 31, no. 4, pp. 251—275.

12. *Tariq F., Bekir G.* Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD // International Journal of Mining Science and Technology. 2017, vol. 27, no. 2, pp. 253—259.

13. *Roghanch P., Kocsis K. C.* Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by redesigning the auxiliary ventilation system: a case study // International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2017, vol. 8, no. 4, pp. 280—293.

14. *Carriere R., McGuire C., McLaren E., Witow D.* Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control / Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium. 2017, pp. 19.7–19.16.

15. *Семин М. А., Левин Л. Ю.* Теоретическое исследование теплообмена между воздушным потоком и крепью шахтного ствола при наличии тепловой конвекции // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6. — С. 151–167. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-151-167.

16. *Медведев И. И.*, *Красноштейн А. Е.* Аэрология калийных рудников. — Свердловск: УрО АН СССР, 1990. — 249 с.

17. *Landahl H. D.* On the remonal of air-bornedrop-lets by human respiatori tract // The Bulletin of Mathematical Biophysics. 1980, vol. 12, pp. 43–56.

18. *Weibel E. T.* Morphometry of the human lung. Berlin, 1963. 156 p.

19. *Косяченко Г. Е.* Гигиенические основы комплексной оценки добычи калийных руд Беларуси и рационального использования спелеосреды месторождения: авто-реф. дис. ... д-ра мед. наук: 14.00.07. — Минск: Белорус. гос. мед. ун-т, 2004. — 38 с.

20. *Жихарев С. Я.*, *Родионов В. А.*, *Пихконен Л. В.* Исследование технологических свойств и показателей взрывопожароопасности каменноугольной пыли инновационными методами // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 45—49. DOI: 10.17580/gzh.2018.6.09.

21. *Колесов Е. В.* Разработка методики расчета количества воздуха, требуемого для проветривания тупиковых проходческих выработок после взрывных работ // Горное эхо. — 2019. — № 3. — С. 80—84. ГИАБ

REFERENCES

1. Kolesnichenko E. A., Artem'ev V. B., Kolesnichenko I. E., Lyubomishchenko E. I. Influence of the length of a dead-end development and ventilation mode on the concentration of methane in the face. *Russian Mining Industry*. 2010, no. 3, pp. 26—30. [In Russ].

2. Fainburg G. Z., Isaevich A. G. Analysis of microcirculation flows between microzones in face areas of blind shear stopes in potash mines with different ventilation methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3, pp. 58—73. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-58-73.

3. Faynburg G. Z., Semin M. A., Isaevich A. G. Interrelation of physical mechanisms, mathematical models and technical methods of airing dead-end mine workings. *Gornoe ekho*. 2020, no. 3, pp. 123—128. [In Russ].

4. Medvedev I. I. *Provetrivanie kaliynykh rudnikov* [Ventilation of potash mines], Moscow, Nedra, 1970.

5. Medvedev I. I., Krasnoshteyn A. E. *Bor'ba s pyl'yu na kaliynykh rudnikakh* [Dust control in potash mines], Moscow, Nedra, 1977.

6. Romanchenko S. B. Control of aero-dust-dynamic processes in the time of underground coal mining. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 5, pp. 298—333. [In Russ].

7. Ivochkin A., Panyuk V., Sargaeva M., Dolgaya Yu., Tseluev E. Dustiness of mine air and measures to combat coal and rock dust. *Energonadzor*. 2015, no. 9(73), pp. 40. [In Russ].

8. Dremov A. V. *Obosnovanie ratsional'nykh parametrov obespylivaniya v kombaynovom prokhodcheskom zaboe* [Substantiation of rational parameters of dedusting in a shearer tunneling face], Candidate's thesis, Moscow, MGGU, 2010.

9. Levin L. Yu., Isaevich A. G., Semin M. A., Gazizullin R. R. Dynamics of air-dust mixture in ventilation of blind drifts operating a team of cutter-loaders. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 1, pp. 72–75. [In Russ].

10. Faynburg G. Z., Ovsyankin A. D., Vaysman O. Ya., Shalaev S. V. Experience in the application of the suction method for ventilating combine workings at the Verkhnekamsk potash mines. *Sovershenstvovanie razrabotki solyanykh mestorozhdeniy: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Improving the development of salt mines: interuniversity collection of scientific papers], Perm, 1990, pp. 122—127. [In Russ].

11. Xu G., Luxbacher K., Ragab S., Xu J., Ding X. Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2016, vol. 31, no. 4, pp. 251 — 275.

12. Tariq F., Bekir G. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 2, pp. 253 — 259.

13. Roghanch P., Kocsis K. C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by redesigning the auxiliary ventilation system: a case study. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2017, vol. 8, no. 4, pp. 280 — 293.

14. Carriere R., McGuire C., McLaren E., Witow D. Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control. *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. 2017, pp. 19.7–19.16.

15. Semin M. A., Levin L. Yu. Theoretical research of heat exchange between air flow and shaft lining subject to convective heat transfer. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6, pp. 151–167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-151-167.

16. Medvedev I. I., Krasnoshteyn A. E. *Aerologiya kaliynykh rudnikov* [Aerology of potash mines], Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 1990, 249 p.

17. Landahl H. D. On the remonal of air-bornedrop-lets by human respiatori tract. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1980, vol. 12, pp. 43–56.

18. Weibel E. T. *Morphometry of the human lung*. Berlin, 1963. 156 p.

19. Kosyachenko G. E. *Gigienicheskie osnovy kompleksnoy otsenki dobychi kaliynykh rud Belarusi i ratsional'nogo ispol'zovaniya speleosredy mestorozhdeniya* [Hygienic foundations of a comprehensive assessment of the extraction of potash ores in Belarus and the rational use of the speleological environment of the deposit], Doctor's thesis, 2004, 38 p.

20. Zhikharev S. Ya., Rodionov V. A., Pikhkonen L. V. Innovative methods for investigating technological properties and explosion/fire risk data of coal dust. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 6, pp. 45 — 49. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.6.09.

21. Kolesov E. V. Development of a method for calculating the amount of air required for ventilation of dead-end tunneling workings after blasting operations. *Gornoe ekho*. 2019, no. 3, pp. 80 — 84. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Файнбург Григорий Захарович[1] — д-р техн. наук,
профессор, главный научный сотрудник, e-mail: faynburg@yandex.ru,
Исаевич Алексей Геннадиевич[1] — канд. техн. наук,
зав. сектором, e-mail: aero_alex@mail.ru,
Зайцев Артем Вячеславович[1] — д-р техн. наук,
зав. сектором, e-mail: aerolog.artem@gmail.com,
[1] Горный институт Уральского отделения РАН.
Для контактов: Исаевич А.Г., e-mail: aero_alex@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.Z. Fainburg[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Chief Scientific Researcher, e-mail: faynburg@yandex.ru,
A.G. Isaevich[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, e-mail: aero_alex@mail.ru,
A.V. Zaytsev[1], Dr. Sci. (Eng.), Head of Sector, e-mail: aerolog.artem@gmail.com,
[1] Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.
Corresponding author: A.G. Isaevich, e-mail: aero_alex@mail.ru.

Получена редакцией 11.09.2020; получена после рецензии 07.12.2020; принята к печати 10.07.2021.
Received by the editors 11.09.2020; received after the review 07.12.2020; accepted for printing 10.07.2021.

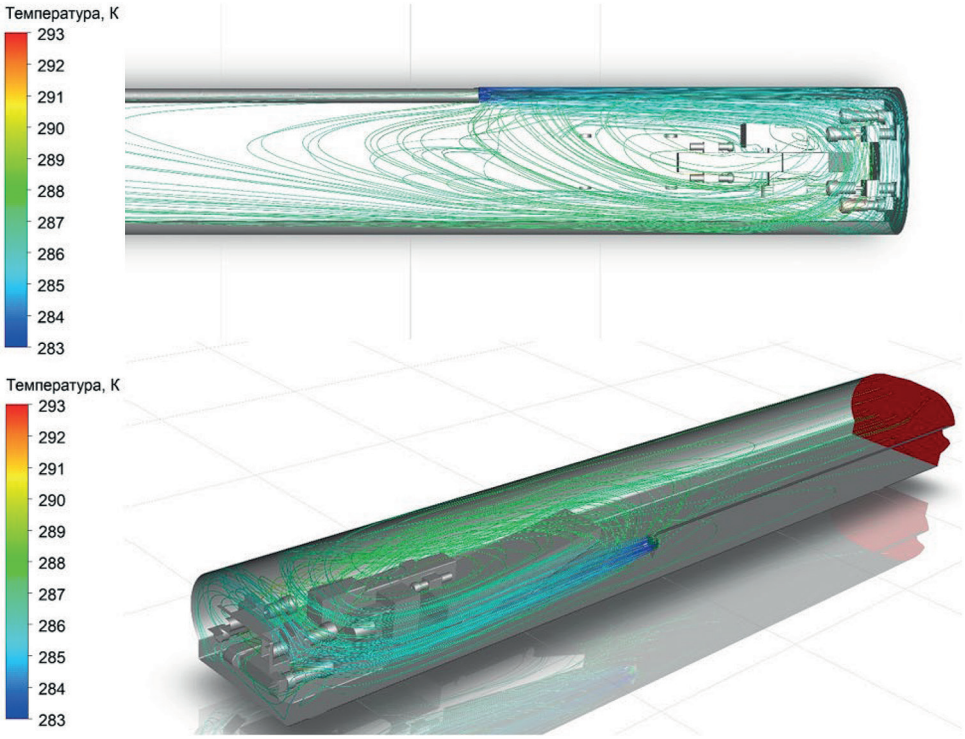

Рис. 3. Рассчитанные линии тока при нагнетательном способе проветривания. Воздушный вихрь, образующийся при нагнетательном способе проветривания в призабойной части

Fig. 3. Calculated air flow lines in blowing ventilation. Air eddy generated in blowing ventilation in face area

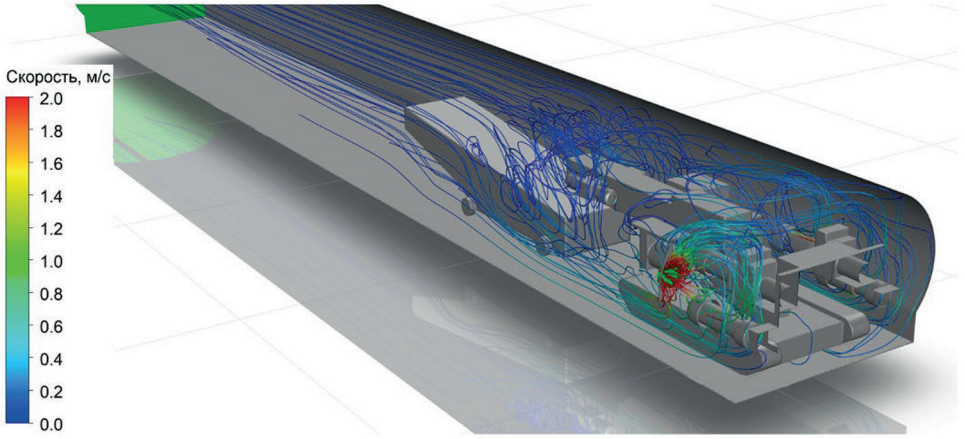

Рис. 5. Результаты моделирования всасывающего способа проветривания с учетом работы систем охлаждения электродвигателей

Fig. 5. Modeling results of suction ventilation with regard to operation of engine cooling systems