

2. Стариков А.Н., Мальцев С.В., Исаевич А.Г. Совершенствование подхода к определению относительной газообильности рабочих зон рудников Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 9. – С. 99-113. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_99.
3. Земсков А.Н., Лискова М.Ю. Распределение газов по разрезу продуктивных толщ калийных месторождений // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2020. – №. 2. – С. 271-283.
4. Николаев А.В., Максимов П.В., Земсков А.Н., Коногоя Д.А., Куимов С.А., Бартоломей М.Л. Оценка адекватности математических моделей и зависимостей распределения газозвушной смеси в пределах тупиковой выработки калийного рудника // Уголь. – 2022. – №. 10. – С. 60-65. – DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-60-65.
5. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников / УрО АН СССР. – Свердловск, 1990. – С. 119-126.
6. Селиванова С.А. Гигиенические особенности формирования и оптимизация физико-химических условий внутренней среды сильвинитовых сооружений: дис. ...к.м.н.; 14.02.01 / Селиванова Светлана Алексеевна. – Пермь, 2019. – 142 с.: ил.
7. Суханов А.Е., Бруев Н.А., Газизуллин Р.Р., Стариков А.Н. Исследование сорбционных свойств солей на примере газов, содержащихся в атмосфере калийных рудников // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2023. – №. 1. – С. 495-507. – DOI: 10.46689/2218-5194-2023-1-1-495-507.
8. ФР.1.31.2022.42903. ГСИ. Методика измерений объемной доли кислорода, метана, диоксида углерода и массовой концентрации оксида углерода, сероводорода, оксида азота и диоксида азота в атмосфере горных выработок и определения газообильности по горючим газам в горных выработках и шахте в целом.
9. Сметанников А.Ф., Филиппов В.Н. Некоторые особенности минерального состава соляных пород и продуктов их переработки (на примере Верхнекамского месторождения солей) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст. / ПГУ, ГИ УрО РАН. – Пермь, 2010. – С. 99-113. – (Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского; Вып. 13).
10. Чайковский И.И., Уткина Т.А., Исаева Г.А. Эволюция минерального состава нерастворимого остатка солей Верхнекамского месторождения // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 17-20. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.3.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2024.3.14

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ В ТУПИКОВОЙ КОМБАЙНОВОЙ ВЫРАБОТКЕ КАЛИЙНОГО РУДНИКА ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ

А.Е. Суханов, С.В. Мальцев
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Работа проходческо-очистных комбайновых комплексов калийных рудников характеризуется высоким уровнем запыленности в тупиковых выработках. Сложности в решении вопроса по обеспыливанию определяются свойствами калийного массива, которые характеризуются растворимостью породы при использовании мокрых способов. В связи с этим одним из наиболее перспективных методов нормализации пылевой обстановки является адаптация существующих систем вентиляции тупиковых выработок. В работе предлагается использование комбинированного способа проветривания с условием преобладания всасывающего вентилятора. Данное условие позволяет изолировать исходящую воздушную струю от свежей и направлять загрязненный воздух через всасывающий трубопровод на вентиляционные выработки. Предлагаемый подход позволяет обеспечить тупиковую выработку от устья камеры до проходческо-очистного комплекса. В статье описан процесс построения и валидации трехмерной гидродинамической модели распространения мелкодисперсной пыли в тупиковой выработке и произведены расчеты в условиях нагнетательного и комбинированного способов проветривания. На основании полученных результатов произведены опытно-промышленные испытания комбинированного способа проветривания в условиях действующего калийного рудника.

Ключевые слова: вентиляция тупиковых выработок, калийный рудник, пыль, проходческо-очистной комплекс, трехмерное моделирование, комбинированный способ проветривания.

Введение

Применение калийных удобрений в сельском хозяйстве позволяет увеличивать урожайность на 30-40% [1]. Большая часть калийной руды добывается горными предприятиями подземным способом. Существующие тенденции развития горной промышленности направлены на рост мощностей предприятий, как следствие, используется высокопроизводительное оборудование. Добыча полезного ископаемого механизированным способом сопровождается высоким уровнем запыленности в тупиковых забоях. Так, например, на калийных рудниках Российской Федерации во время проведения исследований фиксировались показания концентрации мелкодисперсной пыли, в тысячи раз превышающие безопасную норму для человека, величина которой равна 5 мг/м^3 [2, 3].

В настоящее время на железно-рудных и угольных месторождениях преобладает способ обеспыливания горных выработок с применением воды. В угольных шахтах, где пыль обладает свойством взрываться [4, 5], и полиметаллических рудниках не видится сложным использование мокрых способов обеспыливания ввиду того, что пожарные и технические водопроводы прокладываются до мест ведения проходческих и очистных работ, что не распространено на калийных рудниках ввиду высокой протяженности шахтного поля.

В работе [6] рассматриваются способы обеспыливания горных комбайнов с избирательным исполнительным органом, один из которых также основан на распространении воды вблизи забоя, посредством форсунок. Описаны оптимальные параметры давления подачи жидкости, а также геометрические параметры распространяемой струи. Основная решаемая проблема в работе обозначена как низкая эффективность применяемых способов пылеподавления ввиду того что все методы борьбы с запыленностью в забое были изначально нерегулируемыми, то есть, при их применении рассчитывались заранее параметры пылеподавления без учета динамики процессов.

В работах [7, 8] описаны попытки использования воды и пены в тупиковых забоях калийных рудников. Предлагаемые мероприятия показали свою эффективность на начальных стадиях эксплуатации системы пылеподавления, однако основными недостатками являлись отсутствие постоянного источника воды в комбайновой выработке и выход из строя форсунок, распыляющих воду и пену.

Рассматриваемые способы пылеподавления с применением воды не применимы в условиях калийных рудников. Это связано прежде всего с гигроскопичностью горных пород, которые составляют разрабатываемый продуктивный пласт. Второй причиной является негативное влияние данного способа пылеподавления на работу горных машин и оборудования. В связи с чем актуальной задачей является разработка способов пылеподавления без применения мокрых методов, суть которых заключается в перераспределении воздушных потоков и изменении системы вентиляции тупиковых горных выработок. На сегодняшний день единственными способами пылеподавления в тупиковых комбайновых выработках на калийных рудниках Российской Федерации является применение системы пылеотсоса с тканевым фильтром и вентиляционные способы, суть которых заключается в вытеснении вредных примесей свежим воздухом [9]. Данная система не отличается высокой эффективностью ввиду того, что тканевые фильтры быстро забиваются, а горнорабочие не успевают отслеживать степень загрязнения фильтра.

Согласно действующим федеральным нормам и правилам «Правила безопасности при ведении горных работ...» [10], проветривание тупиковых забоев разрешается с применением нагнетательного вентилятора или комбинированным способом, но с преобладанием работы нагнетательного вентилятора. Для описанных способов характерной чертой является создание высокотурбулентных потоков в тупиковой выработ-

ке [11], в результате чего не происходит образование застойных зон, в которых способны скапливаться горючие и ядовитые газы.

Авторами данного исследования предполагается, что использование комбинированного с преобладанием всасывающего способа проветривания позволит значительно снизить концентрации пыли в тупиковой комбайновой выработке калийных рудников. Основанием для исследования описываемого способа проветривания послужила статья [12], в которой доказана перспективность использования всасывающего способа проветривания с целью пылеподавления в призабойном пространстве. В связи с этим выполнена серия математических расчетов, доказывающих эффективность предлагаемых способов проветривания. В данной работе также описаны требования для узаконивания предлагаемого способа обеспыливания калийных тупиковых комбайновых выработок.

Для построения трехмерной математической модели проведены натурные измерения, необходимые для валидации создаваемой модели. Объектом исследования в данной работе является тупиковая горная выработка с расположенным в ней проходческо-очистным комплексом. Проветривание забоя осуществляется при помощи нагнетательного вентилятора ВМ-8. Вентиляционная труба нагнетательного трубопровода была проложена вдоль стены выработки со стороны кабины машиниста комбайна. Отставание конца трубы от кабины машиниста составляло 10 м, а скорость воздуха на выходе из трубопровода – 9 м/с. В ходе проведения исследований были произведены замеры геометрических параметров выработки, температурно-влажностные параметры рабочей зоны, концентрация мелкодисперсной пыли, скорость воздуха.

Замеры концентрации пыли в тупиковой выработке осуществлялись при помощи прибора ПКА-01, который предназначен для измерения массовой концентрации витающей пыли любого происхождения. Скорость воздуха определялась при помощи рудничного анемометра АПР-2. На рисунке представлены усредненные по высоте концентрации в точках замеров.

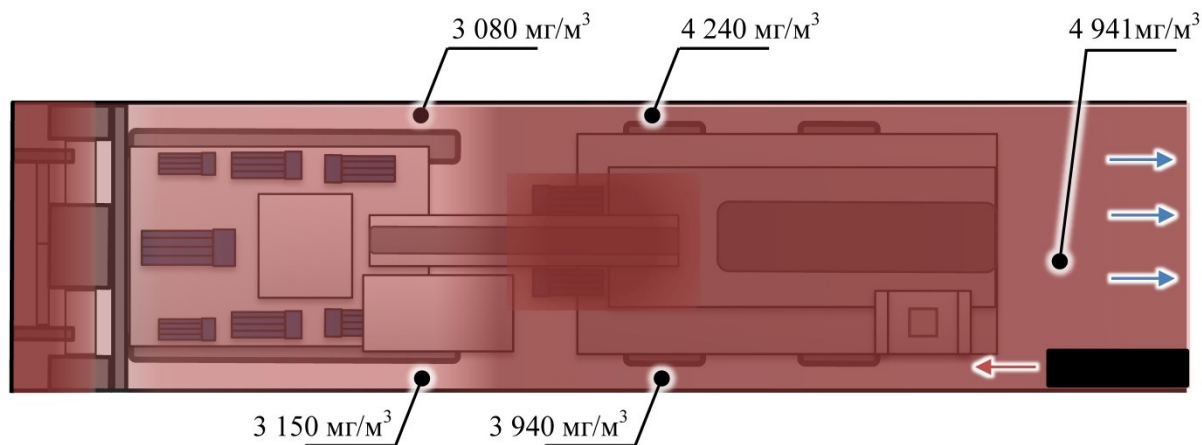


Рис. 1. Градиентная заливка, характеризующая пылевую обстановку в исследуемом забое с количественным представлением концентраций пыли (замеры усреднены по высоте) – вид сверху

Анализ полученных замеров, а также визуальная оценка пылевой обстановки при натурных исследованиях показали, что основная масса взвешенной мелкодисперсной пыли образуется на стадии перегрузки отбитой горной породы с комбайна на самоходный вагон. В сечении, проходящем через перегрузочную стрелу, средняя концентрация пыли с правой стороны комбайна составила 4 240 мг/м³, а с левой стороны – 3 940 мг/м³. Далее по тракту движения исходящей струи средняя концентрация пыли

возросла до $4\,941\text{ мг/м}^3$ ввиду того, что поток воздуха подхватывает пыль, сыпавшуюся в кузов самоходного вагона и сносит ее в сторону устья выработки.

Пылеобразование при перегрузе вызвано тремя факторами. Во-первых, пылевые потоки образуются в результате вытеснения воздуха из кузова самоходного вагона при заполнении его рудой. Во-вторых, падающая руда эжектирует поток воздуха. В результате этого создаются местные турбулентные завихрения. В-третьих, низкое значение относительной влажности воздуха (20%) способствует интенсификации процесса образования пыли.

Для проведения расчетов распределения пылевых частиц в воздухе тупиковой выработки разработана трехмерная гидродинамическая модели в программном комплексе Ansys. При формулировке модели предполагается, что в нормальных условиях работы вентиляции поток воздуха в тупиковой выработке является стационарным, несжимаемым, непрерывным и турбулентным. Описание характера движения турбулентного потока происходило при использовании $k-\varepsilon$ модели модификации «Realizable» [13].

При определении граничных условий было принято, что из отверстия нагнетательного трубопровода выходит воздушный поток, а устье выработки имеет нулевое избыточное давление. Отдельное внимание уделено моделированию работы системы обдува электрических двигателей проходческо-очистного комбайна. Данные элементы способны создавать определенные локальные завихрения, а также создавать тепловую конвекцию ввиду их сильного нагрева. Было выделено два источника пылевыделения: работа исполнительных органов, а также зона перегруза. Произведена валидация и верификация разработанной модели.

Результаты расчетов, полученные при валидации модели, представлены на рисунке 2. Отставание вентиляционного трубопровода составляло 10 м, диаметр выходного отверстия вентиляционного става – 0,5 м.

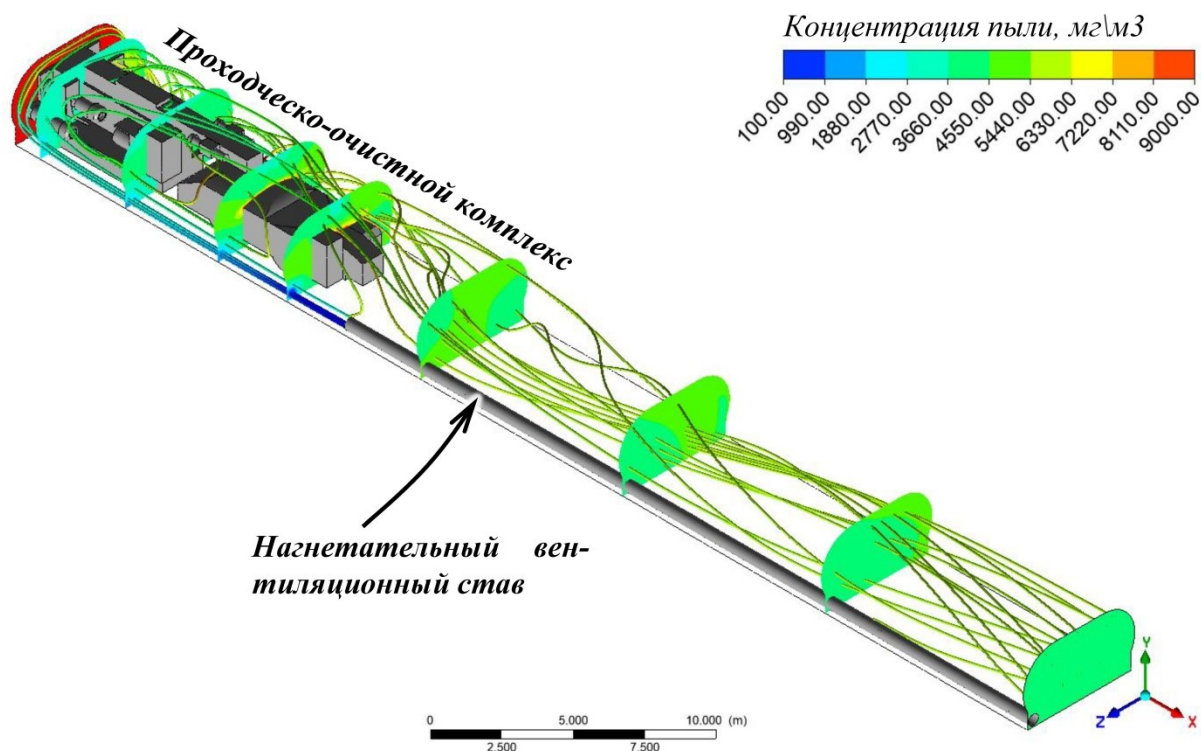


Рис. 2. Распределения линий тока движения воздуха и размерной концентрации пыли при нагнетательном способе проветривания в тупиковой выработке

Струя воздуха, выходящего из вентиляционной трубы, расположенной с левой стороны комбайна, движется по направлению к забою и кабине машиниста комбайна. При этом рабочее место подвержено высокому уровню запыленности, который, согласно градиентной заливке, превышает 5000 мг/м^3 . Причиной этого является наличие вихрей, образующихся при таком способе подачи воздуха. Переток воздуха возле забоя приводит к дополнительному насыщению его пылью, поэтому в правой части выработки концентрация пыли становится больше, чем в левой. Затем большая часть потока воздуха протекает над кузовом самоходного вагона в направлении устья выработки, унося с собой пыль, образовавшуюся при погрузке измельченной руды. Однако образуется рециркуляционный вихрь.

Комбинированный способ проветривания тупикового забоя может быть необходим в случаях: если всасывающий вентилятор планируется разместить в забое или когда для забоя характерна высокая газообильность массива горных пород с целью турбулизации воздушных потоков нагнетательным вентилятором, который является частью комбинированного способа.

В представленных расчетах проветривание происходит через два вентиляционных рукава, расположенных в выработке, один из которых нагнетает чистый воздух, а другой, наоборот, засасывает пыльный воздух. Первый вентиляционный трубопровод, который используется для нагнетания чистого воздуха, располагался в нижнем левом углу выработки так, что расстояние между выходным отверстием вентиляционного рукава и кабиной машиниста составляло 10 м. Второй вентиляционный трубопровод, используемый для всасывания загрязненного воздуха, располагался с правой стороны выработки. Таким образом, расстояние между выходным отверстием второго вентиляционного рукава и щитом проходческо-очистного комбайна составляет 50 см. От кровли и правой стенки выработки рукав также отдален на 50 см. Диаметр вентиляционного става равен 500 мм.

Ранее в этой работе упоминалось, что комбинированный с преобладанием всасывающего способ проветривания имеет большую эффективность с точки зрения нормализации пылевой обстановки при сравнении с нагнетательным способом. Преобладание всасывающего способа подразумевает собой, что воздух по горной выработке будет поступать по направлению от устья камеры к призабойному пространству. Удаление исходящего потока при этом происходит по вентиляционному трубопроводу всасывающего вентилятора. В результате чего будет присутствовать механизм вытеснения мелкодисперсной пыли в тупиковой горной выработке. Нагнетательный же способ проветривания характеризуется процессами смешения различно загрязненных воздушных потоков, что влечет за собой циркуляцию пылевых частиц в зоне расположения проходческо-очистного комплекса. Смешивание потоков воздуха и образование локальных вихрей при комбинированном способе проветривания подтверждает численный расчет, представленный на рисунке 3. Основной вихрь образуется вокруг проходческо-очистного комбайна, который проходит зону сыпания руды со стрелы комбайна в самоходный вагон. В результате чего пыль подхватывается воздушным потоком и устремляется в зону рабочего места машиниста проходческо-очистного комбайна.

Чистый поток воздуха, нагнетаемый из первого вентиляционного става, движется вдоль почвы в левой части выработки в направлении забоя, захватывая при этом пыльный воздух, стекающий по кузову вагона к ее левой стенке. Возле забоя воздух перетекает по верху комбайна с левой на правую часть выработки, также формируется возвратное течение, которое вдоль кровли движется в направлении устья выработки.

Проводя сравнение характера движения воздушных потоков при комбинированном (с преобладанием всасывающего) способе проветривания с нагнетательным, результаты которого представлены на рисунке 2, можно отметить, что при комбинированном способе больший объем воздуха перетекает в правую часть выработки. Данное явление связано с влиянием всасывающего режима проветривания посредством второго всасывающего вентиляционного трубопровода. Однако, несмотря на низкую скорость нагнетательного проветривания, возвратное течение остается достаточно выраженным, так, что пыль переносится за самоходный вагон. При рассмотрении условной плоскости, проходящей вдоль кабины машиниста комбайна, видно, как пыльный воздух, унесенный возвратным течением за самоходный вагон, переносится течением, вызванным всасывающим проветриванием, к выходному отверстию нагнетательного вентиляционного рукава и, вливаясь в нагнетаемый поток, движется в направлении кабины машиниста комбайна.

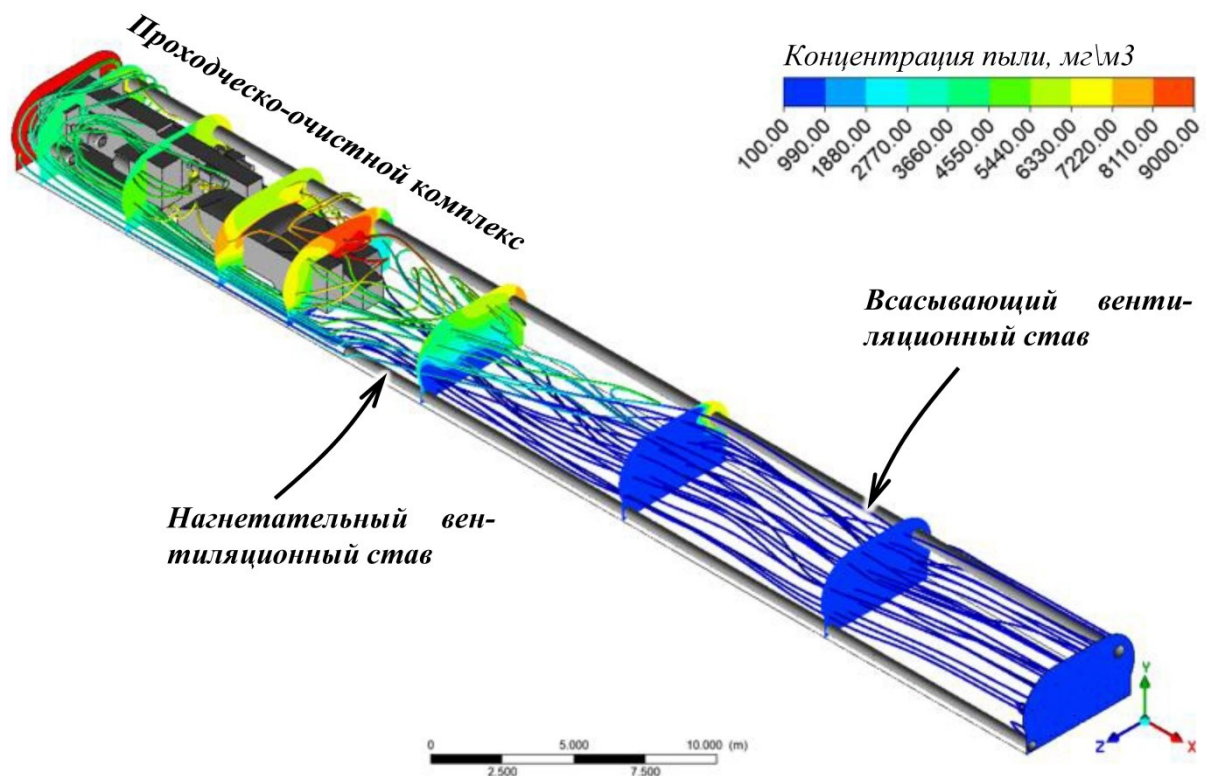


Рис. 3. Распределения линий тока движения воздуха и размерной концентрации пыли в воздухе при комбинированном способе проветривания

По результатам выполненного моделирования проведены опытно-промышленные испытания эксплуатации системы вентиляции с применением комбинированного способа проветривания (с преобладанием всасывающего вентилятора) в условиях одного из калийных рудников Российской Федерации. Объектом исследования являлась тупиковая горная выработка с расположенным в ней проходческо-очистным комплексом, в состав которого входили комбайн Урал-20Р и самоходный вагон. Сравнение производилось с нагнетательным способом проветривания. В момент проведения замеров скорость движения воздуха в выработке при нагнетательном и комбинированном способах проветривания составляла 0,18 м/с. В качестве зоны исследования запыленности принято рабочее пространство машиниста комбайна, которое располагается с левой стороны комбайна вблизи кабины. Полученные величины концентраций пыли представлены на рисунке 4.



Рис. 4. Сравнение нагнетательного и комбинированного (с преобладанием всасывающего) способов проветривания в районе кабины машиниста комбайна

Результаты экспериментальных измерений, представленные на рисунке 4, подтверждают эффективность применения комбинированного способа проветривания в сравнении с нагнетательным по пылевому фактору.

Выводы

В работе предлагается к рассмотрению комбинированный способ проветривания (с преобладанием всасывающего способа) для снижения концентрации мелкодисперсной пыли как в призабойном пространстве, так и по всей длине тупиковой выработки. Эффективность способа подтверждена результатами трехмерного численного моделирования, а также в ходе проведения опытно-промышленных испытаний.

Основная сложность внедрения предлагаемого подхода заключается в ограничении применения комбинированного (с преобладанием всасывающего способа) способа проветривания на законодательном уровне. Одним, и на сегодняшний день единственным, способом узаконивания предлагаемых решений является разработка обоснования безопасности опасного производственного объекта с установлением недостающих требований к существующим пунктам федеральных норм и правил. Документ должен сопровождаться компенсирующими мероприятиями, устанавливающими требования к безопасному ведению работ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500030-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Zhang W., Zheng F., Wei D., Shen G., Zeng X., Kon'kova N.G. Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium base fertilizers on growth and yield of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin // Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. – 2023. – V. 184, № 1. – P. 70-78. – DOI 10.30901/2227-8834-2023-1-70-78.
- Исаевич А.Г., Кормщиков Д.С. Исследование пылевой обстановки в условиях калийного рудника, опыт снижения запыленности атмосферы рабочих мест // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2018. – № 4. – С. 60-74.
- Файнбург Г.З., Исаевич А.Г. Анализ микроциркуляционных потоков между микроразностями в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3. – С. 58-73. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-58-73.
- Смирняков В.В., Родионов В.А., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 71-81. – DOI: 10.31897/PMI.2022.12.
- Родионов В.А., Цыганков В.Д., Жихарев С.Я., Кормщиков Д.С. Методика исследования аэродинамических свойств каменноугольной пыли в протяженных горизонтальных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 10. – С. 69-79. – DOI: 10.25018/0236-1493-2021-10-0-69.

6. Брейдо И.В., Дрижд Н.А., Марквардт Р.В. Методы обеспыливания в комбайновом проходческом забое // Труды университета. – 2016. – №. 1. – С. 67-70.
7. Овсянкин А.Д. Исследование и разработка способов мокрого обеспыливания в комбайновых забоях калийных рудников: дис. ... к.т.н. 05.15.02 / Овсянкин Аркадий Дмитриевич. – Пермь, 1975. – 231 с.: ил.
8. Овсянкин А.Д. Борьба с пылью на проходческих комбайнах с помощью водовоздушных завес // Технология и безопасность горных работ: сб. ст. / ППИ. – Пермь, 1974. – Вып. 150. – С.
9. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Борьба с пылью на калийных рудниках. – М.: Недра, 1977. – 192 с.
10. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
11. Тимошенко А.М., Никифоров Д.В., Ворошилов Я.С., Поморцев А.А. Анализ существующих способов проветривания тупиковых подготовительных выработок // Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – №. 2. – С. 54-64.
12. Isaevich A.G., Semin M., Levin L., Ivantsov A., Lyubimova T. Study on the Dust Content in Dead-End Drifts in the Potash Mines for Various Ventilation Modes // Sustainability (Switzerland). – 2022. – V. 14, № 5. – Номер статьи 3030. – DOI: 10.3390/su14053030.
13. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 18.0. – ANSYS, 2017. – 1034 p.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2024.3.15

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРОВЕТРИВАНИЯ РУДНИКОВ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ

Н.А. Трушкова, Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье рассматривается опыт и особенности применения частичного повторного использования воздуха на калийных рудниках, приведен новый подход к разработке и внедрению рециркуляционных систем на рудниках РФ, вызванный изменениями в нормативной документации, обозначены основные пункты, обязательные при разработке обоснования безопасности опасного производственного объекта (ОБ ОПО). Указано, что в современных условиях применение рециркуляции возможно в системах проветривания рудников любого типа путем разработки ОБ ОПО с соблюдением мер безопасности и реализации компенсирующих мероприятий, учитывающих особенности конкретного объекта.

Ключевые слова: рециркуляционная установка, система проветривания, правила безопасности, обоснование безопасности опасного производственного объекта.

Первая редакция правил безопасности, в которой появился пункт, регламентирующий применение частичного повторного использования воздуха, вышла в 2003 году [1], это был пункт № 160, в котором указано: «Для повышения эффективности проветривания рабочих зон допускается частичное повторное использование воздуха, прошедшего промежуточную очистку от газообразных и взвешенных вредных примесей. Степень промежуточной очистки должна быть такова, чтобы концентрация взвешенных и ядовитых газообразных примесей в воздухе, поступающем на повторное использование, не превышало 30% от ПДК, а по горючим и взрывоопасным газам 0,01 (1% от нижнего концентрационного предела взрываемости – далее НКПР).

Частичное повторное использование воздуха может осуществляться как в пределах всего шахтного поля, так и на отдельных его участках, имеющих обособленное проветривание.