

На правах рукописи



**Исаевич Алексей Геннадьевич**

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЫЛЕВОЙ  
ОБСТАНОВКОЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ**

Специальность 2.8.6

«Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Пермь 2023

Диссертация подготовлена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» («ГИ УрО РАН») – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН).

Научный консультант: **Левин Лев Юрьевич**

чл.-корр. РАН, доктор технических наук, профессор кафедры РМПИ ПНИПУ, заместитель директора по научной работе, «ГИ УрО РАН» (г. Пермь).

Официальные  
оппоненты:

**Коршунов Геннадий Иванович**

профессор, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности производств, СПГУ, Горный университет (г. Санкт-Петербург).

**Кобылкин Сергей Сергеевич**

доктор технических наук, профессор кафедры безопасности и экологии горного производства, Университет науки и технологий МИСИС (г. Москва).

**Стась Галина Викторовна**

доктор технических наук, доцент кафедры геотехнологий и строительства подземных сооружений, Тульский государственный университет (г. Тула).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова.

Защита диссертации состоится «12» июля 2023 года в \_\_:\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская 78 а. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «ПФИЦ УрО РАН»: <http://www.permsc.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направлять в двух экземплярах не позднее, чем за 15 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и электронная почта лица предоставившего его.

Отзывы необходимо направлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78 а. Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02. Электронная почта: [lserg@mi-perm.ru](mailto:lserg@mi-perm.ru)

Ученый секретарь  
диссертационного совета, канд. техн. наук

С. Ю. Лобанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

В условиях постоянного роста населения планеты аграрная промышленность уже не может выращивать достаточные объёмы сельскохозяйственной продукции без периодического внесения калийных удобрений. В связи с этим общее производство калийных удобрений постоянно растёт, и с 1950 г. мировая добыча калия увеличилась в 8 раз. Соответственно увеличиваются темпы и масштабы добычи калийной руды горнодобывающими предприятиями.

Увеличение объемов добычи происходит, как за счет ввода новых рудников, так и за счет применения современного все более производительного оборудования. Однако применение такого оборудования приводит к увеличению количества вредных примесей, выделяемых в атмосферу рабочей зоны при разрушении массива горных пород, а также при транспортировке уже отбитого полезного ископаемого. Пыль соляных горных пород, образующаяся при отбойке, транспортировке, подъёме полезного ископаемого, является одной из таких примесей.

Как показывает практика, увеличение запыленности рудничной атмосферы намного выше предельно допустимых концентраций (ПДК) –  $5 \text{ мг/м}^3$  характерно и для камерной системы разработки, широко применяемой на Верхнекамском и Гремячинском месторождениях (характеризуется ведением работ в тупиковых комбайновых проходческо-очистных забоях), и для столбовой системы разработки длинными очистными забоями (лавами), которая нашла применение на Старобинском месторождении, типичные фактические концентрации пыли достигают значений в  $2500\text{--}3000 \text{ мг/м}^3$  воздуха, т.е. 500-600 ПДК. В некоторых случаях, например, в условиях рудника Гремячинского ГОК значения концентрации пыли могут превышать  $5000 \text{ мг/м}^3$  воздуха (1000 ПДК). При таких значениях запыленности использование средств индивидуальной защиты становится неэффективным, так как применяемые сегодня респираторы рассчитаны на концентрации  $50\text{--}400 \text{ мг/м}^3$ . Это приводит к тому, что, несмотря на применение СИЗОД, доза пыли сильвинита, поступающая в органы дыхания для разных профессиональных групп, составляет от 50 г до 160 г в год.

Соляная пыль не является взрывоопасной, поэтому ее всегда рассматривают с гигиенических позиций. Различные исследования И.И. Медведева, И.Н. Бухарова, А.Е. Красноштейна, Н.И. Николаева, Э.В. Каравайной и др. показали, что пыль калийных рудников, хотя и не обладает ярко выраженными токсическими свойствами, является биологически активной. Периодическое вдыхание ее в больших концентрациях, особенно при длительном нахождении горнорабочих в запыленной атмосфере, вызывает функциональные

сдвиги в печени, в системе гипофиз-кора надпочечников, изменения иммунобиологической активности организма, в легких, слизистой оболочке носа.

Однако гигиеническая вредность соляной пыли является не единственным негативным аспектом высокой запыленности. Уже сегодня разрабатываются проекты по автоматизации процесса добычи калийной руды и внедрению машинного зрения, что в перспективе позволит перейти к безлюдной выемке полезного ископаемого. При этом высокая запыленность атмосферы рабочих зон может стать серьезным препятствием для реализации таких проектов в силу того, что плохая видимость не позволит системам позиционирования работать корректно. Все это делает проблему борьбы с пылью в калийных рудниках актуальной и значимой для дальнейшего развития горных технологий.

Изучению проблемы борьбы с ультравысокой запыленностью рудничной атмосферы калийных рудников посвящены работы видных ученых: Медведева И.И., Красноштейна А.Е., Файнбурга Г.З., Бухарова И.Н., Сметанина М.М., Косяченко Г.Е., Слонченко А.В., Кушелевского В.Г., Агошкова А.И., Казакова Б.П., Казакова А.П., Овсянкина А.Д. и др. Однако, несмотря на полученные результаты, проблема высокой запыленности на современных калийных рудниках полностью не решена.

Кроме того, очевидно, что в современных условиях спроса на калийные удобрения горные предприятия будут стремиться наращивать свою производительность, что еще больше усугубит проблему ультравысокой запыленности рабочих мест калийных рудников без применения инновационных приемов борьбы с пылью.

Одним из средств борьбы с пылью на рабочих местах добычных забоев и в сети горных выработок, включая стволы, является вентиляция. Однако современные подходы к использованию все больших объемов свежего воздуха, направленных, прежде всего, на разжижение образующейся вредности и использующих эффективные для этого способы струйного перемешивания (нагнетательное проветривание тупиковых выработок) давно уже исчерпаны, что связано, в том числе, с ограниченностью пропускной способности стволов. Необходимы новые решения по повышению эффективности использования свежего воздуха. В связи с этим настоящая работа, направленная на повышение эффективности использования свежего воздуха для нормализации пылевой обстановки в забоях и во всей вентиляционной сети горных выработок, является актуальной.

### **Цель работы**

Разработка методов нормализации и управления пылевой обстановкой в горных выработках калийных рудников средствами вентиляции.

## **Основная идея работы**

Использование физических закономерностей структуризации и перераспределения воздушных потоков на основе принципа микрозонирования рабочих зон и усиления доминирования процессов вытеснения пыли из объектов проветривания над процессами смешения различно загрязнённых объемов рудничной атмосферы.

## **Основные задачи работы:**

1. Проанализировать текущее состояние проблем высокой запыленности атмосферы калийных рудников, способов снижения концентрации соляного аэрозоля, и выявить причины их низкой эффективности.
2. Разработать методологию и обосновать перспективные подходы к решению борьбы с пылью в горных выработках калийных рудников.
3. Провести экспериментальные исследования динамики микроциркуляционных потоков пылевоздушных смесей в пространстве тупиковой комбайновой выработки при различных способах проветривания.
4. Разработать математическую модель движения пылегазовоздушной среды в тупиковой комбайновой выработке, учитывающую расположение и влияние работающего комбайнового комплекса на структуру воздушных потоков и запыленность, для оценки эффективности процессов смешения и переноса при различных способах проветривания с использованием принципов зонирования рабочего пространства тупиковых выработок.
5. Разработать технические решения по повышению эффективности использования свежего воздуха, поступающего на проветривание рабочей зоны, и снижения концентрации вредных соляной пыли и газообразных примесей на рабочих местах.
6. Оценить безопасность и эффективность всасывающего способа проветривания при условии выделения в рабочую зону горючих и серосодержащих газов.
7. Предложить технические решения по снижению массовой концентрации соляного аэрозоля в длинных очистных забоях (лавах), а также в поверхностном разгрузочном комплексе.
8. Провести экспериментальные исследования динамики и спектрального состава сильвинитового аэрозоля при движении по сети горных выработок, определить коэффициенты осаждения и функцию генерации соляного аэрозоля.
9. Разработать сетевую модель движения соляных аэрозольных частиц в системе горных выработок разных типов.

10. Разработать модуль программного комплекса «Аэросеть», позволяющий моделировать распространение сильвинитовой пыли по шахтной вентиляционной сети.

**Методы исследований** включали анализ и обобщение литературных источников, отражающих вопросы свойств и вредности соляной пыли, практический опыт борьбы с высокой запыленностью рудничной атмосферы калийных рудников, экспериментальные натурные исследования динамики соляных аэрозолей, математическое моделирование и сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и численного моделирования.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Достоверное описание динамики вихревых потоков и соляного аэрозоля в пространстве тупиковых комбайновых выработок инструментами численного трехмерного моделирования требует учета конфигурации горно-добычного оборудования, а также влияния его механического и теплового воздействия на атмосферу рабочей зоны.
2. Доминирование в практике проветривания тупиковых комбайновых выработок процессов смешения загрязнённых объемов воздуха, реализуемых при нагнетательном способе проветривания, снижает эффективность использования свежего воздуха и не может обеспечить нормативно требуемый уровень пылевой обстановки на рабочих местах.
3. Повышение эффективности проветривания тупиковых комбайновых выработок достигается при всасывающем способе проветривания и основывается на многозональном расчленении воздушного пространства горной выработки за счет использования механизмов вытеснения и организации микроциркуляционных потоков, позволяющих локализовывать и оперативно удалять загрязненные пылью объемы воздуха.
4. Целенаправленное использование процессов вытеснения, реализуемое при всасывающем способе проветривания тупиковых комбайновых выработок, обеспечивает нормализацию пылевой обстановки на рабочих местах, а также позволяет не допускать образование опасных скоплений горючих и ядовитых газов.
5. Сетевая модель массопереноса соляной пыли в аэродинамически связанной системе горных выработок, использующая эмпирически определенные параметры, позволяет прогнозировать концентрацию соляной пыли в любой точке вентиляционной сети и разрабатывать мероприятия по нормализации в ней пылевой обстановки.

### **Научная новизна:**

1. Разработана трехмерная математическая модель турбулентного движения воздушно-соляной и бинарной газовой смеси в тупиковой комбайновой выработке, учитывающая расположение и работу двигателей комбайнового комплекса.
2. Обоснована безопасность и эффективность применения всасывающего способа проветривания тупиковой комбайновой выработки в условиях калийных рудников при выделении в рабочую зону горючих и серосодержащих (токсичных) газов.
3. Предложен способ нормализации пылевой обстановки на рабочих местах в тупиковой комбайновой выработке, использующей зонирование ее воздушного пространства и повышающий в эффективность использования свежего воздуха, подаваемого на проветривание.
4. Разработана сетевая модель конвективно-диффузионного массопереноса соляных аэрозольных частиц в системе аэродинамически связанных горных выработок, учитывающая процессы коагуляции частиц и конденсации на них влаги, ведущие к эффективному осаждению частиц пыли и определены важнейшие входящие в математические уравнения модели эмпирические параметры.
5. Разработаны алгоритмы численного расчета краевых задач массопереноса соляной пыли, определенных на ориентированном графе, что позволяет моделировать распространение соляной пыли по шахтной вентиляционной сети.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается хорошей сходимостью результатов математического моделирования и натурных экспериментальных исследований, сопоставимостью полученных данных с результатами других авторов, проводивших исследования в области борьбы с пылью, значительным объемом натурных наблюдений и численных экспериментов, положительными результатами реализации технических решений.

### **Практическое значение и реализация результатов работы**

Полученные результаты позволяют использовать новый подход к нормализации состава атмосферы тупиковой комбайновой выработки, основанный не на увеличении количества подачи свежего воздуха, а на повышении эффективности его использования путем выделения «зоны дыхания», других микрозон и организации выноса примесей из наиболее загрязненных зон, минуя зону дыхания.

Предложенные принципы применения всасывающего способа проветривания тупиковых комбайновых выработок отражены в нормативной документации ОАО «Беларуськалий».

Технические решения снижения концентрации сильвинитовой и глинисто-солевой пыли при добыче калийных солей в условиях селективной выемки руды длинными очистными забоями внедрены на руднике 1 РУ ОАО «Беларуськалий».

Разработанная модель движения пылегазовоздушной смеси в тупиковой комбайновой выработке, учитывающая детальную геометрию комбайнового комплекса и специфику его работы, может быть использована для решения задач повышения эффективности проветривания тупиковых выработок калийных и каменно-соляных рудников.

Созданный модуль расчета задач динамики пылевой обстановки в вентиляционной сети рудника для вычислительного комплекса «АэроСеть», предназначенного для решения широкого спектра задач рудничной вентиляции, позволяет решать эти задачи с учетом пылевой обстановки.

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Диссертационная работа выполнена в соответствии с государственными планами научных исследований «ГИ УрО РАН», проводившихся в период 2015—2022 гг., по темам «Разработка теоретических основ прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями режимов проветривания и газодинамическими явлениями в рудниках при освоении месторождений минерального сырья» (регистрационный номер НИОКТР: АААА-А17-117120620167-2) и «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими и аэрологическими процессами в рудничной атмосфере и массивах горных пород при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (регистрационный номер НИОКТР: АААА-А18-118040690029-2), а также с тематикой хоздоговорных работ с горными предприятиями ОАО «Беларуськалий», ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий».

С 2015 по 2022 гг. исследования по теме диссертации были поддержаны и частично финансировались Российским научным фондом проект РНФ № 19–77- 30008 «Разработка теоретических основ и практических методов интеллектуального мониторинга сложных горнотехнических объектов»), проект № 20-45-596020 «Исследование динамики гигроскопического аэрозоля калийно-магниевых солей в атмосфере горных выработок калийных рудников», проект № 9-15-50125 «Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников».



### **Апробация работы**

Результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях «ГИ УрО РАН» (Пермь 2008–2023), на IV Международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (25-26 октября 2018 года в Санкт-Петербургском горном университете), на международной научно-практической конференции «Горная электромеханика - 2014» (г. Пермь, ПНИПУ, 2014), на II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения безопасности добычи и использования калийно-магниевых солей» (2021 г., Пермь, Россия), на IV международной научно-практической конференции «Горное дело в 21-м веке: технологии, наука, образование» (26-28 октября 2021 г., Санкт-Петербург), на Международном научном симпозиуме «Неделя Горняка» (1 – 4 февраля 2022 г, 1 – 3 февраля 2023 г.).

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора состоял в постановке цели и задач исследования, выборе методики исследований, проведении экспериментальных исследований в условиях действующего рудника, обработке и анализе полученных результатов, участии в разработке математических моделей и модельных задач их верификации, участии в разработке программных продуктов для трехмерного и сетевого моделирования, непосредственном участии автора как ведущего разработчика способов проветривания тупиковых забоев, вошедших в нормативную документацию ОАО «Беларуськалий».

### **Публикации**

По теме диссертации опубликованы 28 научных работ, в том числе 15 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Минобрнауки РФ, 17 входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science.

### **Объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав и заключения. Работа изложена на 266 страницах машинописного текста, содержит 159 рисунков и 33 таблицы. Список использованных источников состоит из 219 наименований, в том числе 45 зарубежных.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### I научное положение

*Достоверное описание динамики вихревых потоков и соляного аэрозоля в пространстве тупиковых комбайновых выработок инструментами численного трехмерного моделирования требует учета конфигурации горно-добычного оборудования, а также влияния его механического и теплового воздействия на атмосферу рабочей зоны.*

Исследование динамики соляной пыли в горных выработках, когда различные объемы воздушной среды смешиваются друг с другом при соприкосновении из-за турбулентных вихрей и иных кратковременных пульсаций потока, представляет собой один из сложнейших вопросов рудничного проветривания. В этой связи огромную роль играет математическое моделирование, позволяющее «понять» структуры течения, динамику соляного аэрозоля в различных точках воздушного пространства, и принять те или иные управляющие этой динамикой решения в виде способов проветривания. Вместе с тем, такое моделирование требует учета реальной трехмерности течения, его турбулизации, стохастичности колебаний потока.

В силу всего вышесказанного успехи цифровизации динамики пылевой обстановки в горных выработках намного скромнее, чем при моделировании переноса тепла и газообразных примесей.

Аналитический обзор опубликованных работ показал, что дискретное описание взаимодействия ансамбля аэрозольных частиц в турбулентном поле движущегося влажного воздуха является чересчур сложным и неинформативным для целей рудничного проветривания. Поэтому было выбрано континуальное представление распределенного по воздушной среде «загрязнения», описываемого весовой (массовой) концентрацией примеси, переносимой воздушным потоком.

Большое значение имеет при этом выбор модели турбулентности. Непосредственное преимущество выбранной нами «Realizable»  $k$ - $\epsilon$  модели состоит в том, что она по сравнению со стандартной  $k$ - $\epsilon$  моделью более точно предсказывает распределение диссипации плоских и круглых струй. Это дает возможность лучшего предсказания вращающихся потоков, пограничных слоев, отрывных течений и рециркуляционных течений, имеющих место в призабойной зоне выработки. Практические расчеты показывают превосходство «Realizable»  $k$ - $\epsilon$  модели при описании потоков, характеризующихся отрывными течениями, и в случае, когда имеют место развитые вторичные течения. Модификация «Realizable»  $k$ - $\epsilon$  модели по сравнению со стандартной

$k$ - $\varepsilon$  моделью содержит улучшенную форму записи турбулентной вязкости, иное уравнение переноса скорости диссипации  $\varepsilon$ , полученное из точного уравнения переноса среднеквадратичного пульсационного вихря. При формулировке модели предполагается, что в нормальных условиях работы вентиляции поток воздуха в тупиковой выработке является стационарным, несжимаемым (дозвуковым) и турбулентным, а кроме того в нем действуют силы плавучести.

С учетом сделанных предположений динамика потока воздуха может быть описана уравнениями неразрывности и Навье-Стокса, усредненными по Рейнольдсу:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{K} + \rho \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = (\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T), \quad (3)$$

где  $\mathbf{V}$  - вектор скорости,  $p$  - давление,  $\rho$  - плотность воздуха,  $\mathbf{g}$  - вектор ускорения свободного падения,  $\mu$ ,  $\mu_t$  - молекулярная и турбулентная вязкости.

В соответствии с моделью «Realizable»  $k$ - $\varepsilon$  эволюция турбулентной кинетической энергии  $k$  и диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$  описываются уравнениями:

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_{wall}, \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b, \quad (5)$$

где  $G_k$  – генерация турбулентной кинетической энергии неоднородностями поля скорости,  $G_b$  – генерация турбулентной кинетической энергии,  $S_{wall}$  – источник энергии турбулентности, учитывающий пристеночные эффекты.

Модель содержит несколько констант, равных:

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad (6)$$

$$S = \sqrt{2 \mathbf{S} : \mathbf{S}}, \quad \mathbf{S} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T), \quad (7)$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2. \quad (8)$$

Турбулентная вязкость рассчитывается по формуле:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (9)$$

где в отличие от стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели  $C_\mu$  не константа, а функция параметров потока:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k S}{\varepsilon}}. \quad (10)$$

Здесь:

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi, \quad (11)$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos(\sqrt{6}W)^{-1}, \quad W = \frac{(\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}) : \mathbf{S}}{S}. \quad (12)$$

Особую сложность при моделировании турбулентных течений вызывает адекватное описание характера течения вблизи границ расчетной области. Граничные условия на твердой стенке должны учитывать влияние вязкости на малых расстояниях от нее, что приводит к появлению тонкого ламинарного слоя. При этом во внешней части пристеночной области турбулентность быстро увеличивается за счет образования кинетической энергии турбулентности вследствие больших градиентов средней скорости. Для корректного учета данных эффектов в настоящей работе используется пристеночная модель Menter-Lechner. Согласно этой модели в уравнение переноса кинетической энергии турбулентности, представленной в формуле (4), добавляется источник  $S_{wall}$ , не равный нулю только в вязком подслое вблизи твердых стенок. Источник  $S_{wall}$  необходим для корректного учета эффектов, наблюдаемых вблизи стенки, где характерные числа Рейнольдса достаточно низки.

Для описания распределения витающей пыли модель турбулентного течения воздушных потоков необходимо дополнить уравнением для массопереноса соляной пыли. Вследствие высоких скоростей вихревого движения воздуха в тупиковой комбайновой выработке и сравнительно небольшого размера рассматриваемой рабочей зоны процессами гравитационного оседания и коагуляции частичек пыли можно пренебречь. В этом случае пространственное распределение соляной пыли может быть описано на основе стандартной модели переноса пассивной примеси:

$$\nabla \cdot (c\mathbf{V}) - \nabla \cdot ((D + D_t)\nabla c) = 0, \quad (13)$$

где  $c$  – безразмерная концентрация примеси,  $D$  – коэффициент диффузии соляной пыли,  $D_t$  – коэффициент турбулентной (вихревой) диффузии, подбираемый на основании известных экспериментальных данных и теоретических соображений.

Размерная концентрация пыли рассчитывается по формуле:

$$C = C_0 + \frac{\Lambda}{\bar{c}} c, \quad (14)$$

где  $C_0$  – минимальная концентрация пыли в выработке вдали от источников загрязнения (фоновый уровень в свежем воздухе),  $\bar{c}$  – средняя безразмерная концентрация,

рассчитываемая в ходе моделирования,  $A$  – эмпирический параметр, имеющий размерность концентрации пыли.

Изменение температуры воздуха в тупиковой выработке определяется уравнением теплопереноса, которое записывается как:

$$\nabla \cdot (\mathbf{V}(\rho E + p)) - \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) = 0, \quad (15)$$

$$E = c_p T - \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}, \quad (16)$$

где  $T$  – температура,  $K_{eff}$  – эффективный коэффициент теплопроводности,  $c_p$  – удельная теплоемкость.

Коэффициент эффективной теплопроводности  $K_{eff}$  равен сумме физической (молекулярной) теплопроводности воздуха и турбулентной теплопроводности:

$$K_{eff} = k + k_t = k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}, \quad Pr_t = 0.85. \quad (17)$$

В дополнение к этому согласно теории идеального газа задается взаимосвязь между плотностью воздуха и его температурой:

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \quad (18)$$

где  $M$  – молярная масса воздуха,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Численный расчет вышеприведенных уравнений осуществляли с помощью коммерческого вычислительного пакета Ansys Fluent, основанного на методе конечных объемов. Расчеты и сравнение результатов с данными натуральных наблюдений проводили для тупиковой выработки, проходимой комбайновым комплексом «Урал-20Р» (рис. 1), в которой наблюдается наибольшая генерация пыли и наиболее сложная пылевая обстановка.

Основным источником пыли при комбайновой выемке является процесс отбойки горной массы, происходящий у груди забоя, и процесс погрузки (свободное ссыпание) отбитой руды, в том числе переизмельченной, в пустой бункер-перегрузатель.

В меньшей степени образование пыли происходит при перегрузке руды из бункера-перегрузателя в самоходной вагон, а также при движении вагона путем сдува пыли с поверхности руды и взметывания ранее осевшей пыли с поверхности выработки, особенно с почвы.

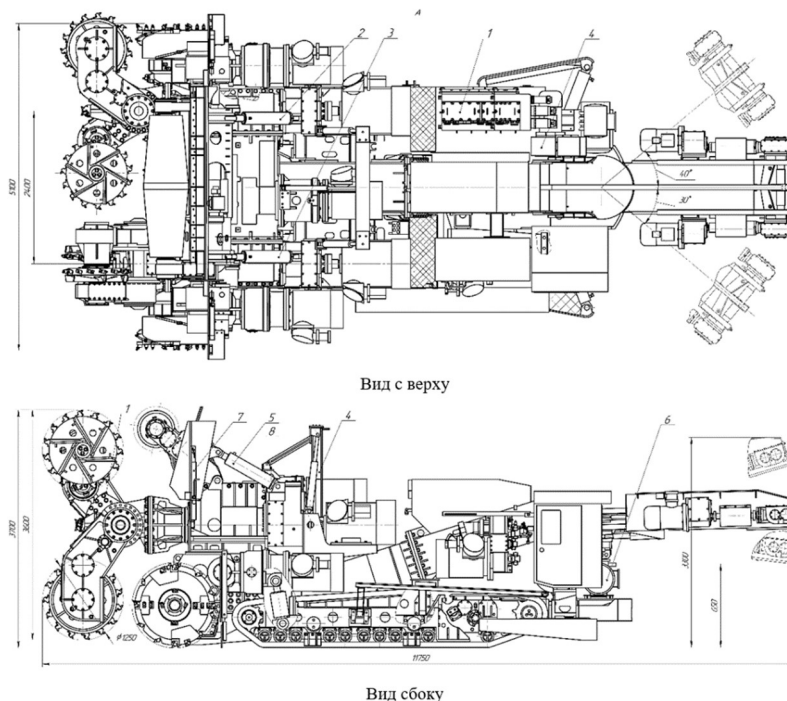


Рисунок 1 – Схема проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р»

В настоящей работе впервые произведен учет конфигурации комбайнового комплекса и построена геометрия воздушного пространства при наличии в выработке комбайна «Урал-20Р» и бункера перегрузателя БП-14 (рис. 2).

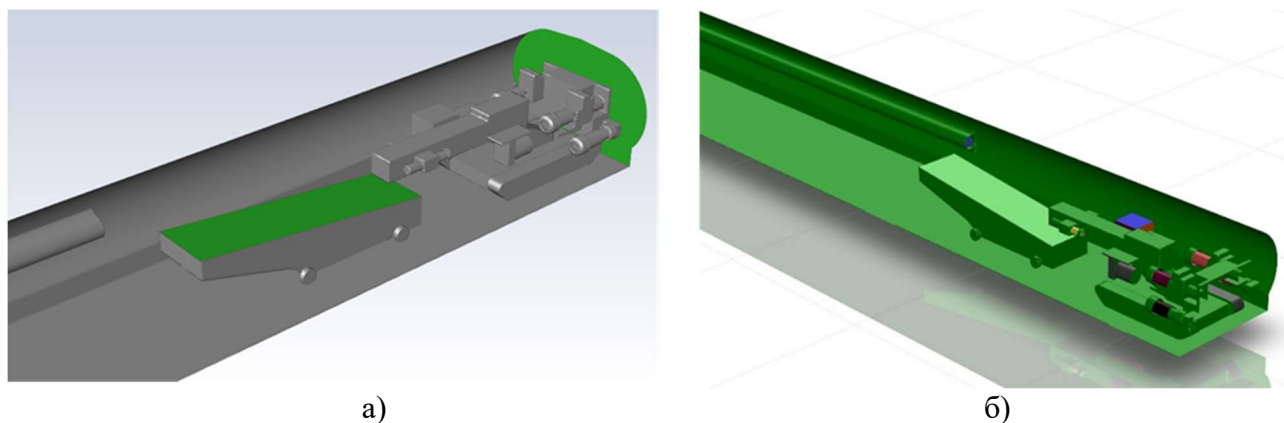


Рисунок 2 – Геометрия расчетной области: (а) цветом показаны поверхности, на которых генерируется пыль; (б) цветом выделены двигатели, кабина машиниста комбайна

Схематизация поверхностей комбайна и отказ от детализации конфигурации оборудования сочеталась с учетом всех элементов, оказывающих влияние на аэродинамические процессы, в частности, всех многочисленных электродвигателей комбайна. Они активно воздействуют на атмосферу рабочей зоны, во-первых, за счет нагрева корпуса двигателя (температура корпуса может находиться в диапазоне от 30 до 60 °С при температуре воздуха 8–12 °С), а, во-вторых, за счет вращения крыльчаток воздушного охлаждения электродвигателей, которые обдувая нагретый корпус, вносят существенный вклад в вихревую структуру и температуру воздушных потоков.

#### *Определение граничных условий*

Для численного решений дифференциальных уравнений (1), (2), (4), (5), (13) и (15) разработанной математической модели течения пылевоздушного потока в тупиковой комбайновой выработке необходимо задать граничные условия на поверхностях расчетной области.

Для нагнетательного способа проветривания на выходном отверстии трубопровода задавали скорость входящего воздушного потока:

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = V_{in}, \quad (19)$$

где  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль к поверхности,  $V_{in}$  – численное значение скорости входящего воздушного потока.

На свободной границе устья тупиковой выработки задавали граничное условие с нулевым избыточным давлением. Это позволяет описать отвод из тупиковой выработки воздуха, нагнетаемого через вентиляционный рукав.

Входное отверстие вентиляционного рукава и устье тупиковой выработки показаны на рисунке 3.

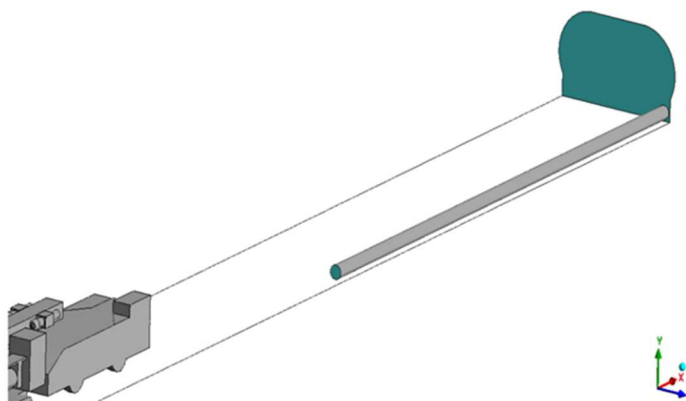


Рисунок 3 – Поверхности входного отверстия вентиляционного рукава и устья тупиковой выработки

Для моделирования течения воздуха, вызванного работой двигателей, на их внутренней вращающейся поверхности задавали касательную компоненту скорости:

$$\mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\tau} = V_{engine}, \quad (20)$$

где  $\boldsymbol{\tau}$  – касательный вектор к поверхности,  $V_{engine} = 5.0$  м/с – скорость воздушного потока, вызываемого крыльчатками во время работы двигателя для его охлаждения.

Геометрия двигателей, представленная на рисунке 4, построена таким образом, чтобы площади входного и выходного отверстий были равны.

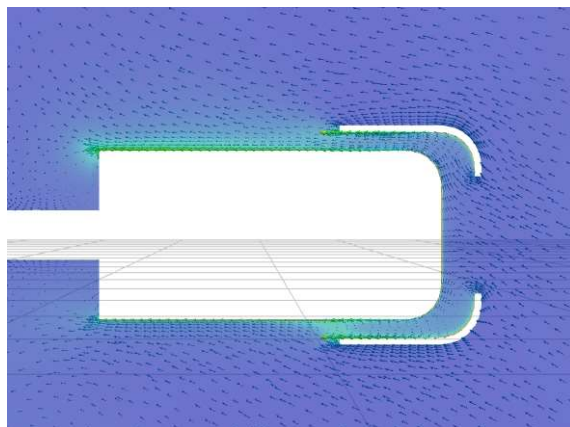


Рисунок 4 – Вертикальное сечение двигателя и характерное векторное поле скорости движения газа, наблюдаемое в расчетах. Цветом показано поле температуры

На остальных поверхностях расчетной области было задано условие стационарной непроницаемой стенки без прилипания воздушного потока.

Для расчета теплопереноса при нагнетательном способе проветривания на выходном отверстии вентиляционного рукава задавалась постоянная температура воздуха:

$$T = T_{in}, \quad (21)$$

где  $T_{in}$  – температура нагнетаемого воздуха.

Из инженерных наблюдений известно, что температура воздуха вблизи стенок выработки практически равна температуре горного массива. Вследствие этого на стенках выработки задавалось граничное условие, аналогичное формуле (21).

Во время работы двигатели нагреваются, поэтому на их внутренней поверхности задавалась повышенная постоянная температура:

$$T = T_{engine} = 47^{\circ}\text{C}, \quad (22)$$

где температура воздуха в двигателе  $T_{engine}$ .

На остальных поверхностях расчетной области для ускорения расчетов при численном моделировании задавали условие отсутствия теплообмена.

Наблюдения показывают, что существенное дополнительное возмущение течения воздушного потока в тупиковой комбайновой выработке происходит при ссыпании отбитой



переизмельченной руды в кузов бункера-перегрузателя или самоходного вагона. Для учета этого процесса на конечной части погрузочной стрелы, нависающей над кузовом, задается скорость ссыпания

$$V = V_{sp} \cdot \mathbf{i}_z, \quad (23)$$

где  $V_{sp} = 1.0$  м/с – скорость течения пыльного воздуха, возникающего при ссыпании руды,  $\mathbf{i}_z$  – единичный вектор, указывающий на направление ссыпания руды (вертикально вниз).

Для расчета пространственного распределения пыли задавали ее генерирование в источниках пылеобразования. Натурные наблюдения показывают, что процесс пылеобразования происходит преимущественно вблизи щита комбайна и в местах ссыпания руды. В связи с этим на поверхности щита комбайна и кузова бункера-перегрузателя или самоходного вагона, показанных на рисунке 5, задавалось граничное условие первого рода для безразмерной концентрации пыли  $C$ :

$$C = 1. \quad (24)$$

Данное условие означает, что поверхность является полностью запыленной и количество пыли не убывает в процессе проветривания, что соответствует реальной ситуации.

Поскольку на стенках выработки примесь оседает, то ставили граничное условие:

$$C = 0. \quad (25)$$

На твердых поверхностях комбайна определялось условие непротекания потока пыли и ее оседание:

$$\mathbf{n} \cdot \nabla C = 0. \quad (26)$$

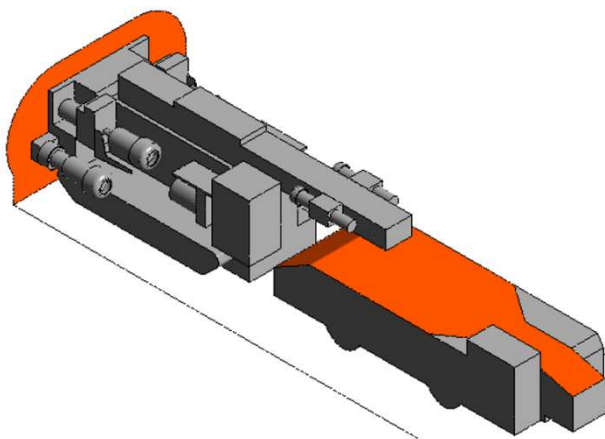


Рисунок 5 – Поверхности щита комбайна и кузова самоходного вагона, на которых происходит генерация пыли

Границы расчетной области дискретизировали гексагональной сеткой. Затем с учетом пограничного слоя вблизи всех твердых поверхностей генерировалась объемная сетка, состоящая из многогранников. Выбор данного типа элемента сетки обусловлен значительным снижением количества конечных объемов по сравнению с тетраэдрической сеткой. В результате ускоряется сходимость вычислений и снижается объем требуемой для вычисления памяти.

На рисунке 6 показаны результаты численного моделирования: распределение линий тока, соответствующих векторному полю скорости течения воздушного потока, и распределение концентрации пыли  $C$  по поперечным сечениям тупиковой комбайновой выработки. Из приведенных результатов, что характер течения воздушного потока качественно соответствует данным натурных наблюдений и измерений.

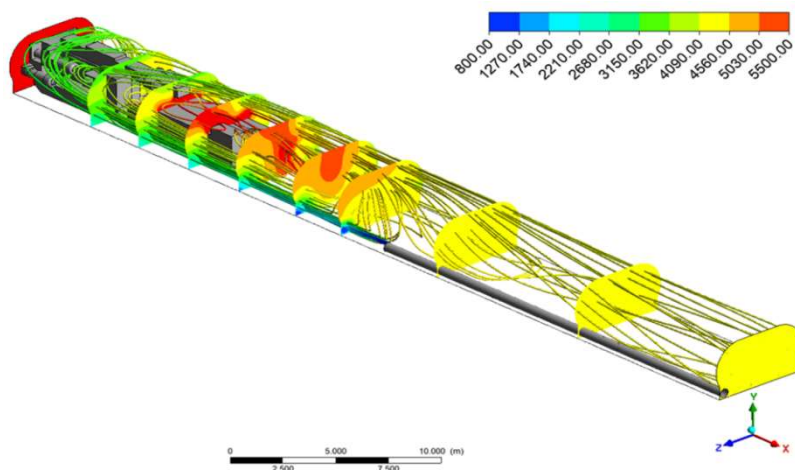


Рисунок 6 – Распределение линий тока, соответствующих векторному полю скоростей течения воздушного потока, и распределения концентрации пыли  $[мг/м^3]$  в воздухе поперечных сечений тупиковой комбайновой выработки

Удостоверившись в возможности предложенной математической модели реалистично описывать структуру течения воздушного потока и распределение пыли для условий нагнетательного проветривания, реализованных в тупиковой комбайновой выработке на руднике Гремячинского ГОК, был проведен анализ количественного соответствия результатов численного моделирования данным натурных измерений.

Для этого был проведен ряд натурных экспериментов в шахтных условиях. В этих экспериментальных исследованиях требуемые методикой замеры проводили в трех основных сечениях, представленных на рисунке 7.

- сечение, проходящее через кабину машиниста 3–3;
- сечение, проходящее через место выгрузки грузчика комбайна 2–2;
- сечение, проходящее в свободной зоне, на расстоянии 30 м от комбайна 1–1.

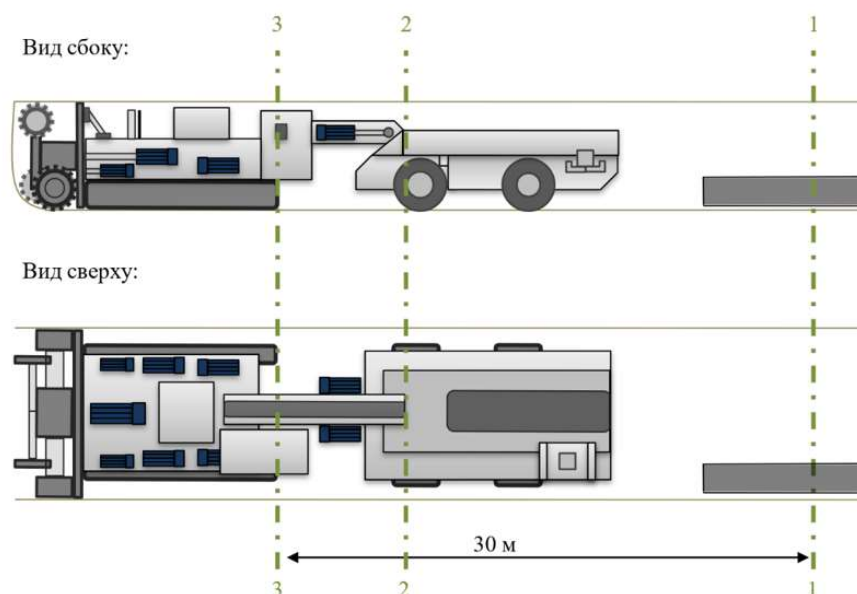


Рисунок 7 – Расположение сечений, в которых производились замеры концентрации пыли и расходов воздуха

На рисунке 8 представлено сравнение модельных профилей компоненты скорости воздушного потока по высоте тупиковой выработки в сечениях 3–3 (кабина машиниста) и 2–2 место ссыпания руды

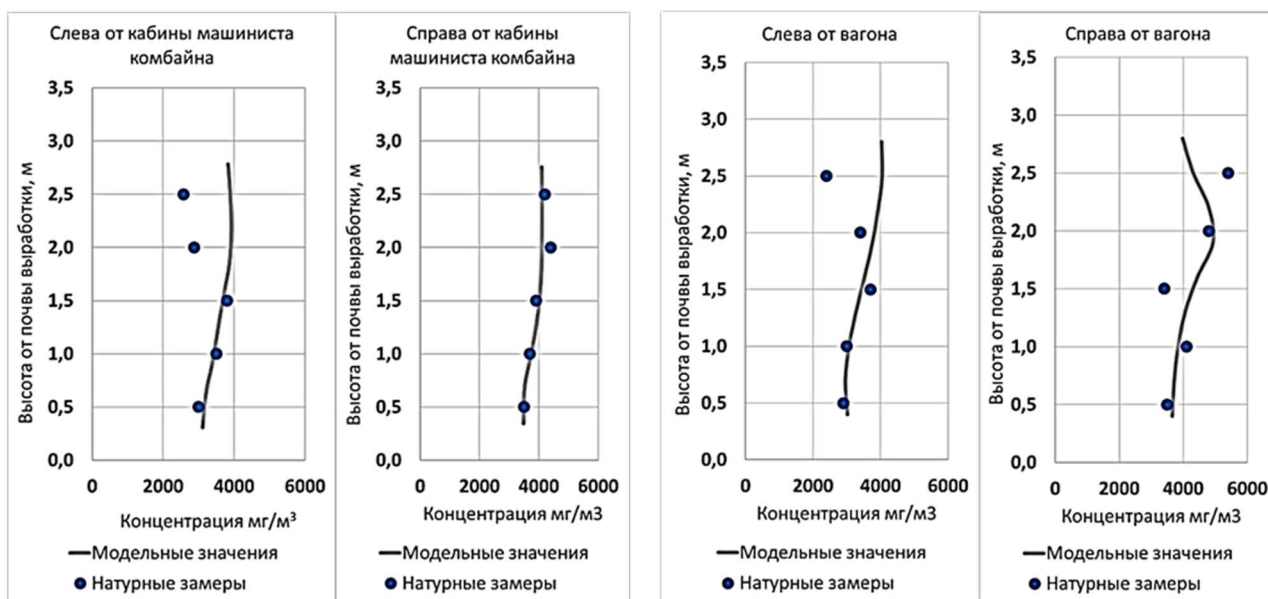


Рисунок 8 – Сравнение измеренных и вычисленных профилей концентрации пыли по высоте тупиковой выработки в сечении 3–3

Представленные графики подтверждают верность построенной математической модели распространения воздушных потоков и концентраций пыли в тупиковой комбайновой выработке.

Тем самым разработан инструмент, позволяющий достоверно решать задачи, связанные с динамикой соляного аэрозоля в условиях тупиковых комбайновых выработок.

## II научное положение

*Доминирование в практике проветривания тупиковых комбайновых выработок процессов смешения загрязнённых объемов воздуха, реализуемых при нагнетательном способе проветривания, снижает эффективность использования свежего воздуха и не может обеспечить нормативно требуемый уровень пылевой обстановки на рабочих местах.*

Движение воздуха и содержащихся в нем вредных примесей в атмосфере горных выработок является результатом действия двух основных механизмов переноса – механизма вытеснения/замещения одного объема воздуха другим без изменения их свойств и механизма смешения/перемешивания этих объемов с изменением их свойств и образованием некоего третьего объема с другими свойствами. Первому механизму (вытеснения) больше соответствует всасывающий способ проветривания. Механизм смешения и перемешивания реализуется в большей степени при нагнетательном способе проветривания. Характерные временные зависимости концентрации вредных примесей в безразмерных координатах в рамках каждого из двух вышеперечисленных подходов представлены на рисунке 9.

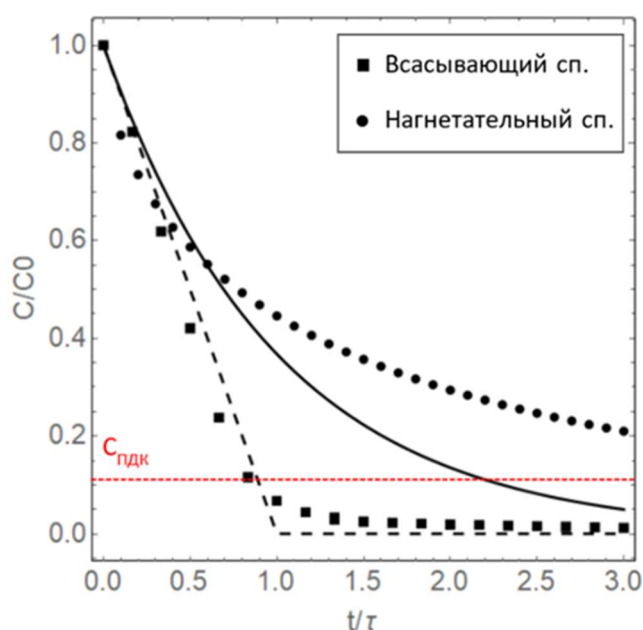


Рисунок 9 – Зависимости средней по проветриваемому объему безразмерной концентрации загрязнения от безразмерного времени проветривания горной выработки. Сплошная линия — идеальное перемешивание, штриховая линия — идеальное вытеснение; точки — результаты численного моделирования

Анализ показывает, что процессы смешения (перемешивания) увеличивают объемы загрязненного воздуха до объема всей проветриваемой области, и тем самым время проветривания до допустимых концентраций увеличивается. Наоборот, процессы вытеснения

примеси происходят намного быстрее т.е. более эффективны. При этом соотношение роли процессов вытеснения и смешения зависит от способа проветривания тупиковой выработки. Заметим, что нагнетательный способ проветривания на сегодняшний день является единственным разрешенным и применяемым способом проветривания тупиковых выработок. Однако его использование характеризуется высоким вихреобразованием в призабойном пространстве, приводящим к интенсивному перемешиванию воздуха, а потому максимальное использование процессов вытеснения примеси практически неосуществимо.

В ходе натурных наблюдений было отмечено, что при нагнетательном способе проветривания струя воздуха, выходящего из вентиляционного става, расположенного с левой стороны комбайна движется по направлению к кабине машиниста комбайна и к груди забоя. При этом рабочее место машиниста комбайна всегда достаточно сильно запылено. Причиной этого является крупный вихрь, образующийся при таком способе подачи воздуха (рисунок 10).

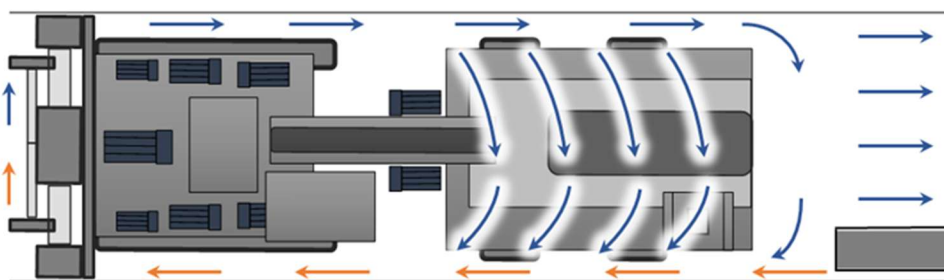


Рисунок 10 – Схематичное изображение воздушных потоков в тупиковой выработке при нагнетательном способе проветривания

На рисунке 11 представлена визуализация результатов численного эксперимента. По условию эксперимента количество воздуха  $Q$ , подаваемое на проветривание, составляло  $3,8 \text{ м}^3/\text{с}$ . Предположив, что образование вихря характерно лишь для определенных скоростей воздуха, выходящего из вентиляционного става, используя возможности численного моделирования, были проведены вычисления с измененным расходом свежего воздуха. В частности, были рассмотрены процессы проветривания при увеличении и снижении подачи воздуха в 2 раза. Результаты вычислений показали, что качественная картина движения воздушных потоков в пространстве рабочей зоны осталась неизменной: вихрь, зафиксированный при стандартных условиях проветривания, присутствует как при снижении подачи воздуха, так и при увеличении.

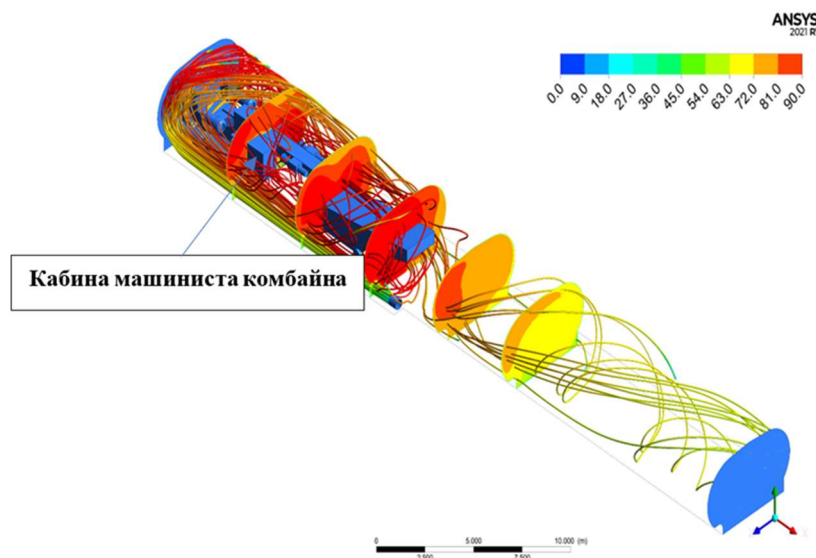


Рисунок 11 – Визуализация течения потоков воздуха в выработке при нагнетательном способе проветривания ( $Q = 3,8 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Цветом показана концентрация пыли

Анализ количественных значений концентрации пылевого аэрозоля на различных расстояниях от забоя при разном количестве воздуха, подаваемого на проветривание, показал (см. рис. 12), что при увеличении количества воздуха, подаваемого на проветривание, концентрация пыли в районе кабины машиниста комбайна не уменьшается, а, наоборот, увеличивается.

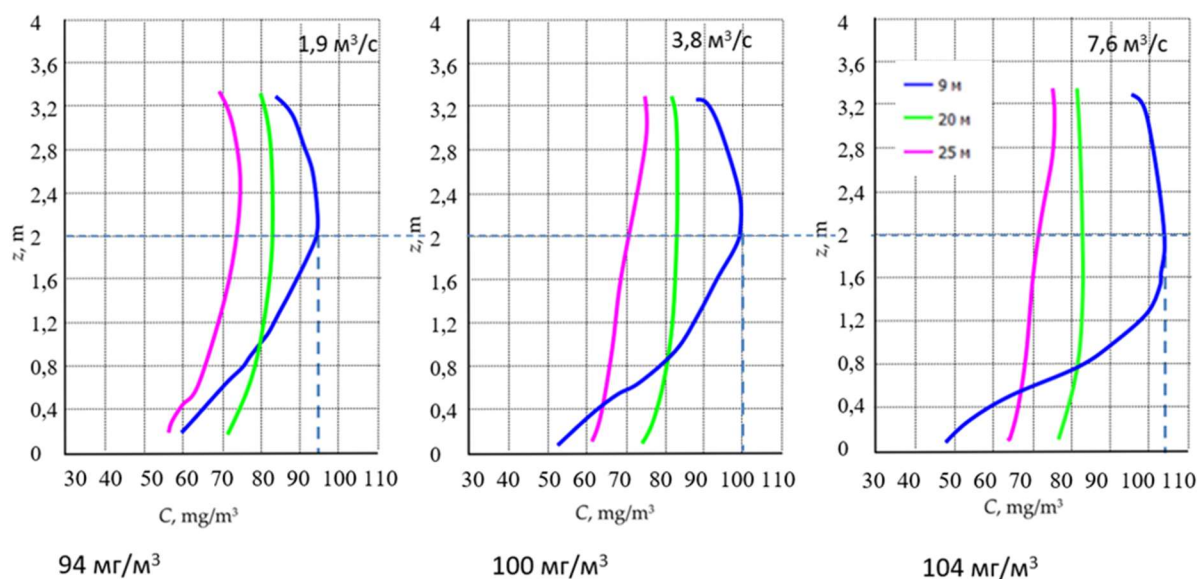


Рисунок 12 – Концентрация пыли на рабочем месте машиниста комбайна при подаче различного количества свежего воздуха при нагнетательном способе проветривания

Эта ситуация объясняется тем, что в тупиковой комбайновой выработке имеется два основных источника пылеобразования: забой выработки (где происходит разрушение массива горных пород) и бункер-перегрузатель или самоходный вагон (в который ссыпается отбитая руда). Активная струя свежего воздуха бьет в грудь забоя, подхватывает образующуюся там пыль, и в силу закона неразрывности потока образует вихрь, возвращающийся к кабине

машиниста комбайна через область ссыпания руды, захватывая там дополнительные объемы витающей пыли.

Таким образом, чем больше свежего воздуха подается в забой, тем интенсивней струя свежего воздуха и образуемый ею вихрь, тем больше пыли захватывает этот вихрь, что и приводит к локальному увеличению концентрации на рабочем месте и в зоне дыхания машиниста комбайна.

### **III научное положение**

*Повышение эффективности проветривания тупиковых комбайновых выработок достигается при всасывающем способе проветривания и основывается на многозональном расчленении воздушного пространства горной выработки за счет использования механизмов вытеснения и организации микроциркуляционных потоков, позволяющих локализовывать и оперативно удалять загрязненные пылью объемы воздуха.*

Практика показала, что единственным реально применяемым и разрешенным сегодня методом проветривания тупиковых комбайновых выработок является общеобменная вентиляция (реализуемая при нагнетательном проветривании). При этом инструментальные замеры, показывают, что во всех без исключения тупиковых комбайновых забоях концентрации пыли намного превышают ПДК. Попытки повлиять на ситуацию путем интенсификации нагнетательного проветривания, а также способами, направленными на стимуляцию процессов агрегации и седиментации частиц, не дают приемлемого результата.

В связи с этим нами предлагается изменить традиционный подход к решению подобных задач и не пытаться снизить концентрацию пыли во всем объеме рабочей зоны (что технически нереально), а выделить отдельные зоны, в которых большую часть времени находятся машинисты комбайна и самоходного вагона и поддерживать в них, а тем самым и в зоне дыхания, минимально технически возможную концентрацию пыли. Предложенный подход, использующий преимущества физического процесса вытеснения пыли, удастся максимально реализовать при всасывающем способе проветривания тупиковой комбайновой выработки.

Для доказательства действенности данного подхода был проведен ряд численных экспериментов по расчету структуры течений и пылевой обстановки при всасывающем способе проветривания при различной интенсивности удаления загрязненного воздуха. За основу бралась производительность вентилятора штатной системы пылеотсоса – 3,12 м<sup>3</sup>/с. Для расширения исследуемого диапазона интенсивности проветривания данное значение увеличивали и уменьшали в 1,5 раза. Место всаса загрязненного воздуха располагали напротив кабины машиниста. На рисунке 13 приведены результаты сравнения массовой концентрации пыли в зоне нахождения машиниста комбайна.

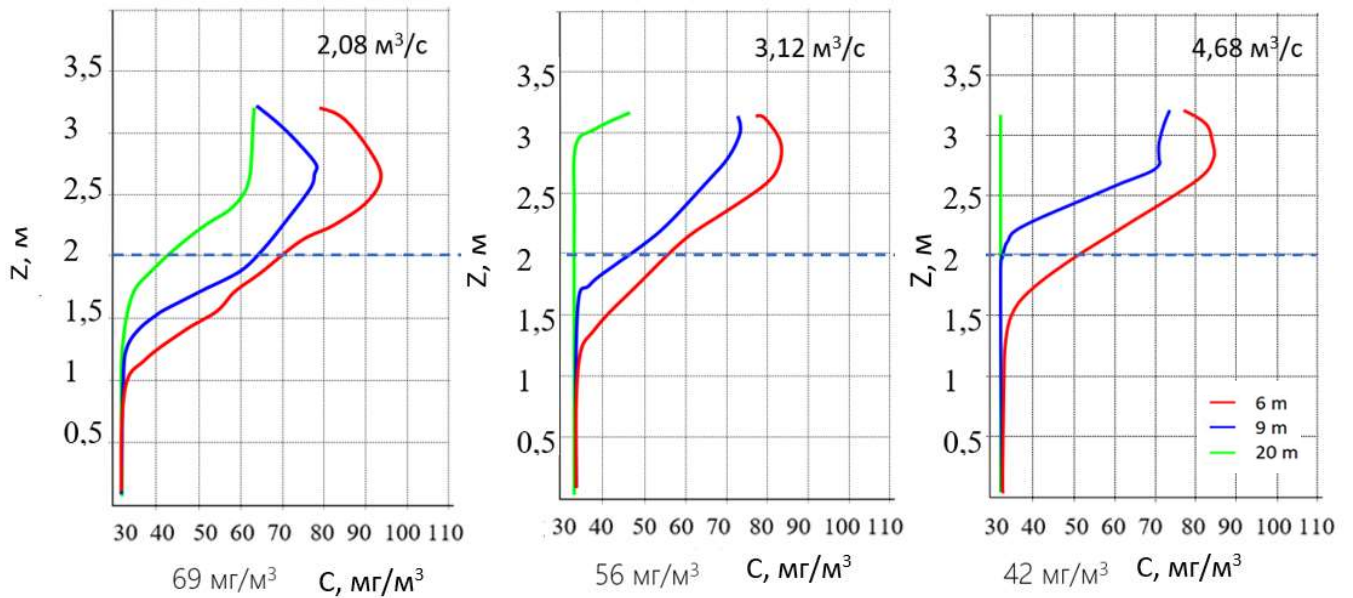


Рисунок 13 – Концентрация пыли на рабочем месте машиниста комбайна при подаче различного количества свежего воздуха при всасывающем способе проветривания

Результаты численного моделирования показали существенное перераспределение содержания соляной пыли в воздушном пространстве. Распределение пыли стало неоднородным, и основной объем загрязненного воздуха сосредоточился в верхней части свободного пространства выше рабочего места (2 м от почвы). При этом увеличение производительности всасывающего вентилятора позволило снизить среднюю концентрацию пыли в районе кабины и зоны дыхания машиниста комбайна (чего не наблюдается при нагнетательном проветривании).

Если рассматривать 3D визуализацию выполненных расчетов (рис. 14), то можно заметить, что чем выше производительность всасывающего вентилятора, тем ближе пылевое облако удаётся прижать к груди забоя и кровле выработки. Если говорить точнее, то к сечению, в котором расположено всасывающее отверстие вентилятора.

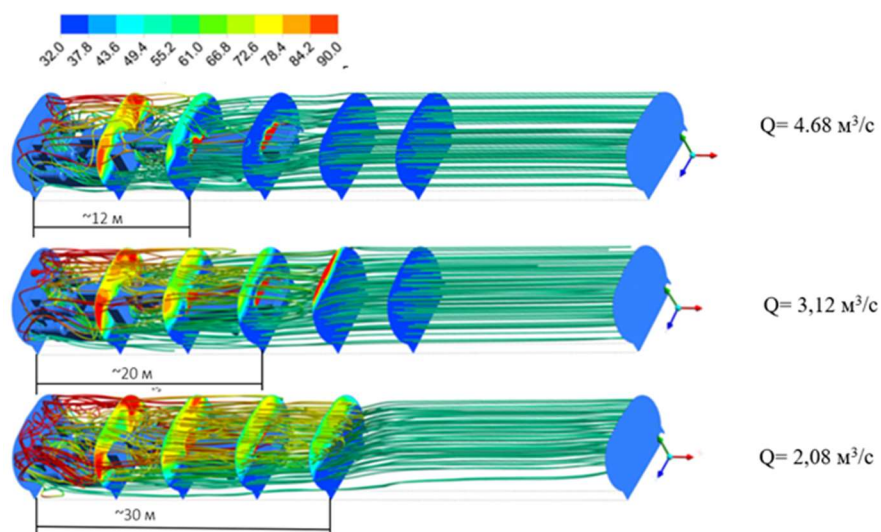


Рисунок 14 – Линии тока воздушных потоков при различных производительностях всасывающего вентилятора (цветом отмечены значения концентрации пыли)



Очевидно, что сечение выработки, в котором расположено всасывающее отверстие вентилятора, является той границей, дальше которой невозможно отодвинуть пылевое облако. Это позволяет сделать предположение о том, что смещение места всаса как можно ближе к забою позволит эффективно локализовать пылевое облако в призабойной части выработки, и кабина машиниста комбайна окажется в минимально запыленной атмосфере.

Для проверки этого предположения место всасывания воздуха было перенесено максимально близко к щиту с правой стороны комбайна (на расстояние 0,5 м от щита).

Сравнение результатов расчета всасывающего способа проветривания с одинаковой подачей воздуха  $Q = 3,12 \text{ м}^3/\text{с}$  при различном размещении всаса вентилятора: 1 - напротив кабины машиниста рис. (15 б) и 2 - в 0,5 м от щита комбайна (рис. 15 а), показало, что приближение места всаса к щиту комбайна позволяет локализовать пылевые потоки в непосредственной близости от щита с правой стороны комбайна в зоне, максимально удаленной от зоны дыхания машиниста комбайна.

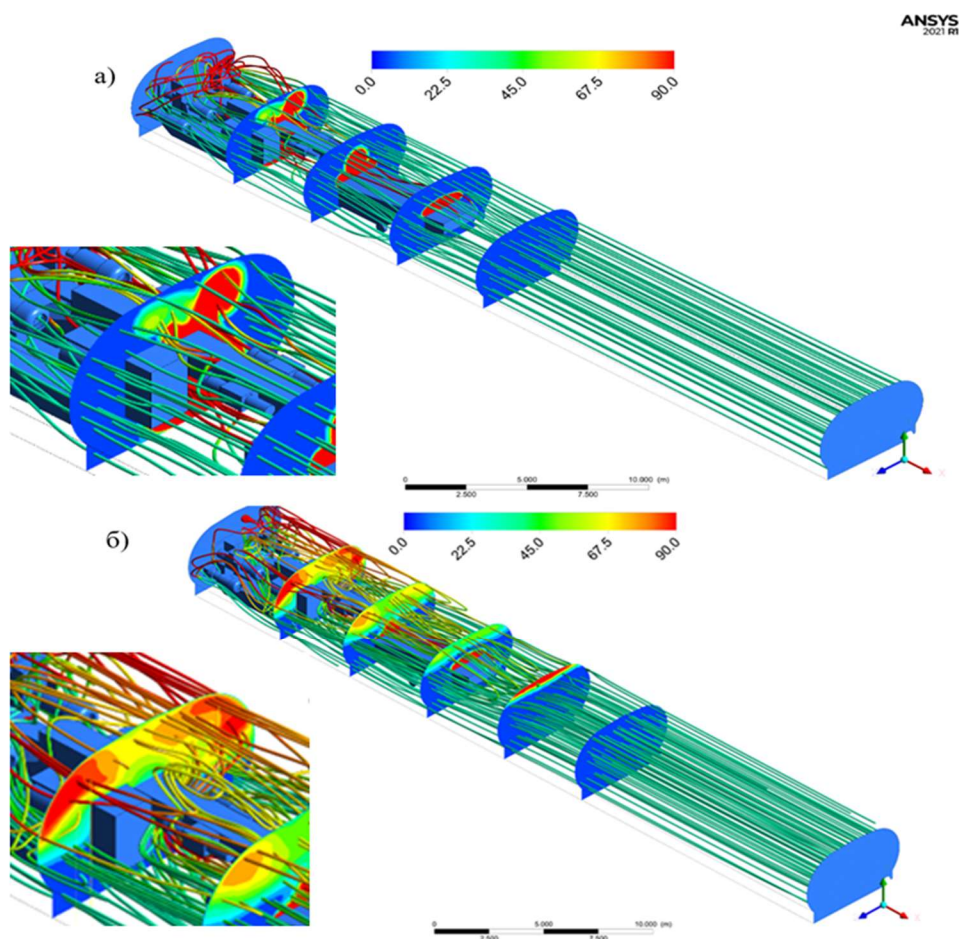


Рисунок 15 – Характер движения воздуха при всасывающем способе проветривания при различном расположении места всасывания: а) в 0,5 м от щита комбайна, б) напротив кабины машиниста комбайна

Таким образом, всасывающий способ проветривания позволяет локализовать пылевое облако с высокими концентрациями пыли в прищитовой зоне и тем самым снизить концентрацию пыли в других зонах, в том числе, в зонах местонахождения и дыхания машиниста комбайна.

При этом на степень локализации пылевого облака можно активно влиять, изменяя производительность всасывающего вентилятора, поскольку при увеличении производительности вентилятора степень локализации возрастает.

#### **IV научное положение**

*Целенаправленное использование процессов вытеснения, реализуемое при всасывающем способе проветривания тупиковых комбайновых выработок, обеспечивает нормализацию пылевой обстановки на рабочих местах, а также позволяет не допускать образование опасных скоплений горючих и ядовитых газов.*

Результаты описанных выше исследований показывают высокую эффективность всасывающего способа проветривания применительно к пылевой обстановке. Однако в выработки калийных рудников выделяется не только пыль, но и природные горючие  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  и ядовитые  $\text{H}_2\text{S}$  газы, содержащиеся в продуктивных пластах и междупластьях.

В кругах горняков, еще со времен применения буровзрывного способа отбойки, традиционно бытует мнение, что всасывающий способ проветривания небезопасен, особенно в условиях газовых шахт, по причине малого спектра всасывания.

Для ответа на вопрос о безопасности применения всасывающего способа проветривания тупиковых комбайновых выработок в условиях выделения горючих или ядовитых газов нами был проведен ряд численных экспериментов.

Используя данные газоздушных съемок, для численного эксперимента были заданы условия, характерные для действующего рудника СКРУ-3 ПАО «Уралкалий», в частности: ожидаемый дебит выделения метана  $0,333 \text{ м}^3/\text{мин}$ , ожидаемый дебит сероводорода  $0,00301 \text{ м}^3/\text{мин}$ , причем выделение газа происходит из-за оградительного щита комбайна. Место всаса расположено на расстоянии  $0,5 \text{ м}$  от щита комбайна. Производительность всасывающего вентилятора варьировалась, а конкретные расходы воздуха выбирались на основании следующих условий:

- $1,12 \text{ м}^3/\text{с}$  (данный расход воздуха требуется для разбавления выделяющегося метана до безопасных концентраций в соответствии с методикой расчета требуемого количества воздуха);
- $1,57 \text{ м}^3/\text{с}$  (данный расход воздуха требуется для проветривания выработки по минимальной скорости воздуха);
- $3,12 \text{ м}^3/\text{с}$  (данный расход воздуха соответствует производительности штатного

вентилятора пылеотсоса);

- 4,68 м<sup>3</sup>/с (данный расход воздуха соответствует производительности пылеотсоса, увеличенной в 1,5 раза).

Рассматриваемые газы (метан и сероводород) имеют различные плотности, что вызывает силы плавучести. В связи с этим при моделировании рассматривались три случая: горная выработка, имеющая наклон 12° вверх; горизонтальная горная выработка и выработка, имеющая уклон 12° вниз. Выбор угла 12° обусловлен технической возможностью комбайна. На рисунке 16 представлены детализированные результаты расчета при различной производительности всасывающего вентилятора.

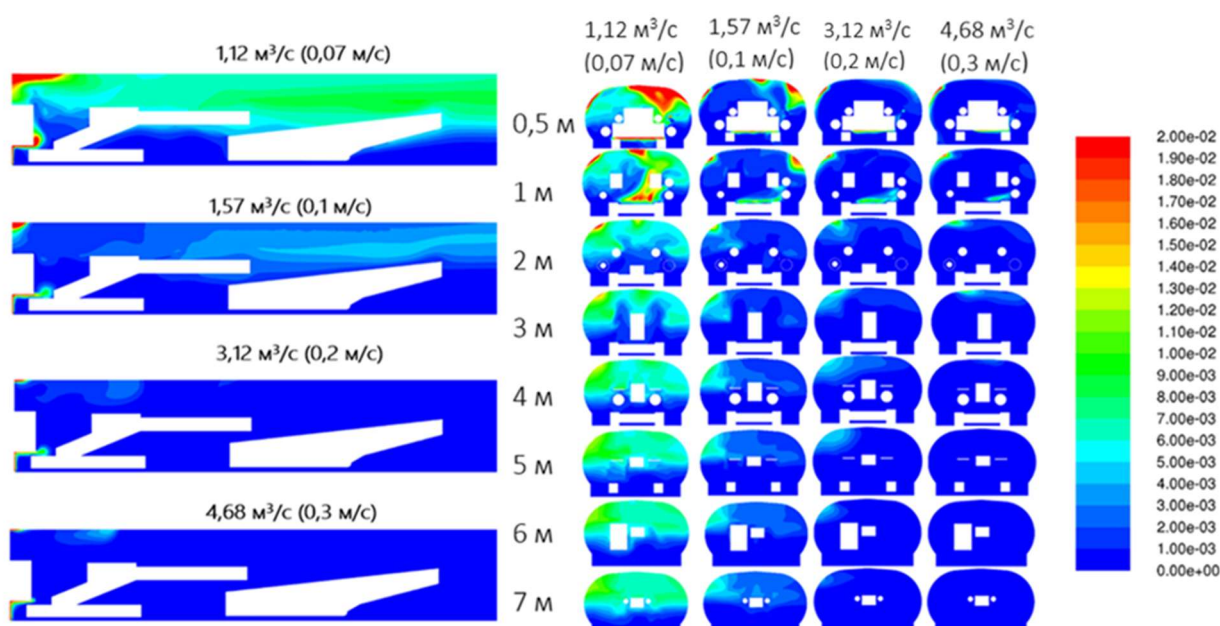


Рисунок 16 – Визуализация результатов расчета распределения метана в горизонтальной выработке при различной производительности всасывающего вентилятора

Результаты вычислений показывают, что в горизонтальной выработке при малой производительности вентилятора (1,12 м<sup>3</sup>/с) метан распространяется в сторону устья выработки, в нашем случае до границы расчетной области. Причем на расстоянии до 4-х метров от забоя наблюдается неравномерность скопления метана (сказывается влияние электродвигателей). Далее стратификация метана становится более равномерной. Загрязненный воздух с небольшой концентрацией метана скапливается в верхней части горной выработки, а более свежий воздух поступает к забою по почве. С увеличением производительности вентилятора до 1,57 м<sup>3</sup>/с картина качественно не меняется, однако концентрация метана под кровлей выработки существенно ниже. Увеличение производительности до 3,12 м<sup>3</sup>/с несколько меняет общую картину. Метан продолжает распространяться в сторону от забоя, но область распространения начинает локализоваться

и ограничивается семью метрами. Доведение производительности всасывающего вентилятора  $4,68 \text{ м}^3/\text{с}$  (что соответствует  $0,3 \text{ м/с}$  скорости воздушного потока в основной части тупиковой выработки) позволяет полностью избежать распространения обогащенной метаном газозвушной смеси по горной выработке.

Аналогичная картина наблюдается и в наклонных выработках. В выработке с уклоном вверх естественная конвекция ограничивает зону распространения метана против основного потока до  $7-8 \text{ м}$  даже при минимальных расходах воздуха. При производительности всасывающего вентилятора  $4,68 \text{ м}^3/\text{с}$  следы метана фиксируются на расстоянии не более  $3-4 \text{ м}$  от оградительного щита.

Расчёты для выработки, имеющей уклон вниз, показывают качественно схожую картину с горизонтальной выработкой с той лишь разницей, что силы естественной конвекции усиливают скорость распространения метано-воздушной смеси, в результате чего возрастает вихреобразование и не наблюдается такая строгая стратификация как в случае с горизонтальной выработкой.

Кроме того, естественная конвекция, усиливающая скорость распространения метано-воздушной смеси под кровлей выработки и процесса смешения, приводит к меньшим концентрациям газа, что хорошо видно на рисунке 17.

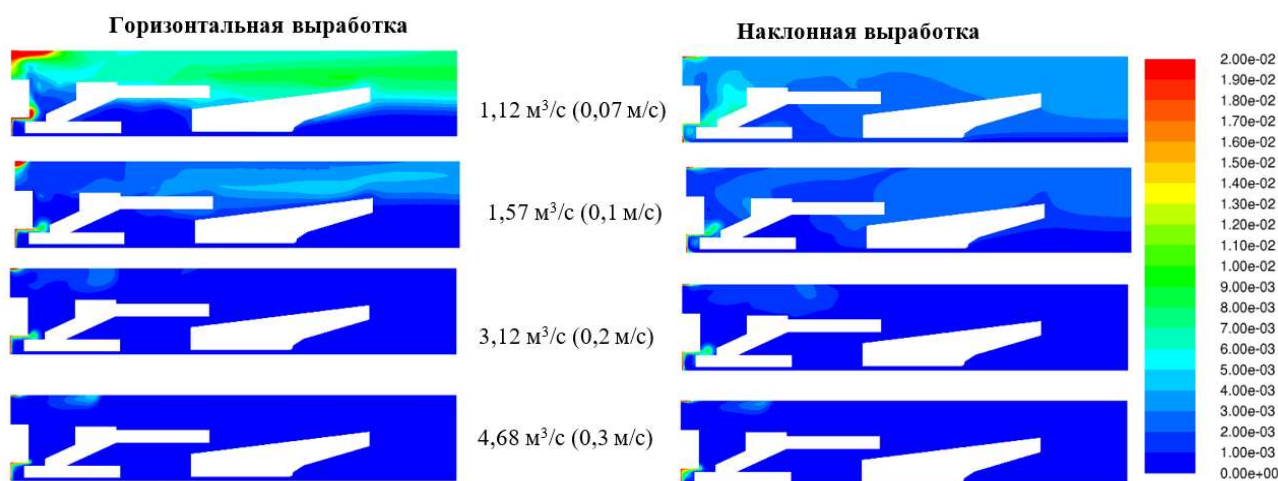


Рисунок 17 – Сравнение результатов расчета в горизонтальной и наклонной ( $12^\circ$  вниз) выработках

При скорости воздуха  $0,2 \text{ м/с}$  отличия между горизонтальной и наклонной выработкой практически исчезают. При скорости воздуха в основной части выработки  $0,3 \text{ м/с}$  следы метана фиксируются лишь на незначительном расстоянии от щита.

Всё это позволяет сделать достоверный вывод о возможности безопасного применения всасывающего способа проветривания в условиях выделения метана.

В отличие от метана сероводород тяжелее воздуха, что будет сказываться на динамике его распространения в рабочей зоне. По данным газозвушных съемок на

рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей концентрации сероводорода в рабочих зонах могут приближаться к значениям ПДК, однако количество выделяющегося газа значительно меньше, чем метана ( $0,00301 \text{ м}^3/\text{мин}$   $\text{H}_2\text{S}$  против  $0,333 \text{ м}^3/\text{мин}$   $\text{CH}_4$ ).

Если рассматривать распределение сероводорода в сечениях на расстоянии 1 м, 2 м и 3 м от оградительного щита (рис. 18), то можно отметить, что благодаря всасывающему способу проветривания (даже с учетом количества воздуха, недостаточного для разбавления газа до безопасных концентраций) происходит локализация зоны загрязнения сероводородом, что не удивительно, т. к. в количественном выражении сероводорода выделяется существенно меньше, чем метана. По этой причине уже на расстоянии двух метров от оградительного щита не фиксируются значимые концентрации газа. На расстоянии 6 м (зона нахождения кабины машиниста комбайна) газ отсутствует как в горизонтальной, так и в наклонной выработке. При этом зоны, где наблюдается сероводород, находятся вне зон дыхания и местонахождения машиниста комбайна. На рабочем месте машиниста самоходного вагона сероводород отсутствует.

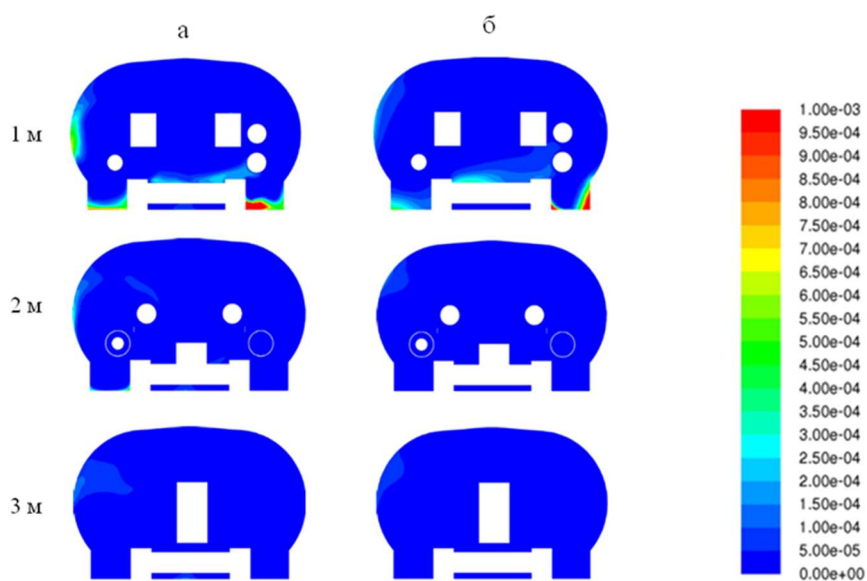


Рисунок 18 – Распределение сероводорода в сечениях на расстоянии 1 м, 2 м и 3 м от оградительного щита. а) горизонтальная выработка, б) наклонная выработка (вниз)

Количество воздуха, необходимое для разбавления данного количества сероводорода до безопасных концентраций, согласно методике расчета требуемого количества воздуха составляет  $425 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $7,08 \text{ м}^3/\text{с}$ ), что в 1,5 раза превышает значение, используемое в расчете. Таким образом, если говорить о ядовитых примесях, всасывающий способ проветривания позволяет эффективно локализовать ядовитый газ и удалить его по воздуховоду, не заполняя все пространство горной выработки при значениях расхода воздуха меньших, чем требуется по действующей методике расчета требуемого количества воздуха.

## V научное положение

*Сетевая модель массопереноса соляной пыли в аэродинамически связанной системе горных выработок, использующая эмпирически определенные параметры, позволяет прогнозировать концентрацию соляной пыли в любой точке вентиляционной сети и разрабатывать мероприятия по нормализации в ней пылевой обстановки.*

Современный калийный рудник обладает разветвлённой системой горных выработок, в которой расположено множество источников пылеобразования. В силу того, что на калийных рудниках широко применяются системы частичного повторного использования воздуха, часть исходящей воздушной струи попадает в главные воздухоподающие выработки. Это диктует необходимость разработки инструментов, позволяющих прогнозировать характер и масштабы распространения пыли в сети горных выработок. Для решения данной задачи необходимо иметь математическую модель динамики частиц соляного аэрозоля в аэродинамически связанной системе горных выработок, учитывающую конвективно-диффузионный перенос частиц вместе с воздушным потоком, коагуляцию частиц и конденсацию на них влаги, оседание частиц на почву горной выработки под действием силы тяжести.

Теоретический анализ закономерностей движения пылевоздушной смеси в системах горных выработок показал, что для описания динамики пылевоздушной смеси в протяженных горных выработках – ветвях вентиляционных сетей целесообразно использовать одномерную модель конвективно-диффузионного массопереноса.

При этом динамика распространения пыли рассматривается в условиях стационарного распределения потоков воздуха, которые удовлетворяют правилам Кирхгофа I-го и II-го рода.

Для каждого узла сети  $V_j$  (сопряжения горных выработок) справедливо равенство:

$$\sum_{i \in V_j} Q_i = 0, \quad (27)$$

Для ветвей сети – горных выработок, «закольцованных» в контур  $C_k$  имеем:

$$\sum_{i \in C_k} (H_i - R_i Q_i |Q_i|) = 0. \quad (28)$$

Нестационарное распределение концентрации пыли в ветви сети рассчитывается с помощью конвективно-диффузионного уравнения вида:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{Q_i}{S_i} \frac{\partial C_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) - \lambda_i C_i + F_i, \quad (29)$$

Здесь  $Q_i$  – расход воздуха в горной выработке №  $i$ , м<sup>3</sup>/с;  $H_i$  – депрессия источника тяги в горной выработке №  $i$ , Па;  $R_i$  – аэродинамическое сопротивление горной выработки №  $i$ ,

$H \cdot c^2 / M^8$ ;  $C_i(x, t)$  – концентрация соляного аэрозоля по длине горной выработки №  $i$ ,  $mg/m^3$ ;  $S_i$  – сечение горной выработки №  $i$ ,  $m^2$ ;  $D_i$  – коэффициент продольной диффузии аэрозоля,  $m^2/c$ ;  $\lambda_i$  – параметр, характеризующий скорость уменьшения концентрации соляного аэрозоля за счет его оседания на почву и стенки горной выработки,  $1/c$ ;  $F_i$  – интенсивность образования пыли в источнике пыления,  $mg/m^3/c$ ;  $t$  – время,  $c$ ;  $x$  – координата по оси  $i$ -той выработки,  $m$ ;  $V_j$  – множество горных выработок (ветвей графа вентиляционной сети), смежных с узлом №  $j$ ;  $C_k$  – множество горных выработок, входящих в контур №  $k$ .

Граничная концентрация пыли  $C_i(t, 0)$  в узле на входе в горную выработку определяется исходя из концентраций пыли  $C_j^{(out)}$  в воздушных потоках, поступающих из других, смежных с ней выработок:

$$C_i(t, 0) = \sum_{j=1}^n \frac{Q_j^{(out)} C_j^{(out)}}{Q_{\Sigma}}. \quad (30)$$

Здесь  $Q_{\Sigma}$  – суммарных расход воздуха через узел,  $m^3/c$ ;  $Q_j^{(out)}$  – расход воздуха в смежной выработке №  $j$ , втекающий в узел;  $n$  – количество ветвей, входящих в узел.

Основными параметрами уравнения переноса (29) являются: коэффициент продольной диффузии  $D$ , скорость уменьшения концентрации пыли за счет её оседания  $\lambda$ , и интенсивность образования пыли в источнике пыления  $F$ .

Коэффициент продольной диффузии представляет собой сумму коэффициентов молекулярной диффузии  $D_{mol}$ , турбулентной диффузии  $D_{turb}$ , диффузии Тейлора  $D_{tlr}$ .

Определение параметра  $\lambda$  проводилось в процессе экспериментальных исследований. При этом изучался фракционный состав и распределения пыли в протяженных сквозных выработках, что позволило определить характер изменения средней концентрации соляного аэрозоля по длине горной выработки.

Результаты оценки фракционного состава соляных пылей приведены на рисунке 19.

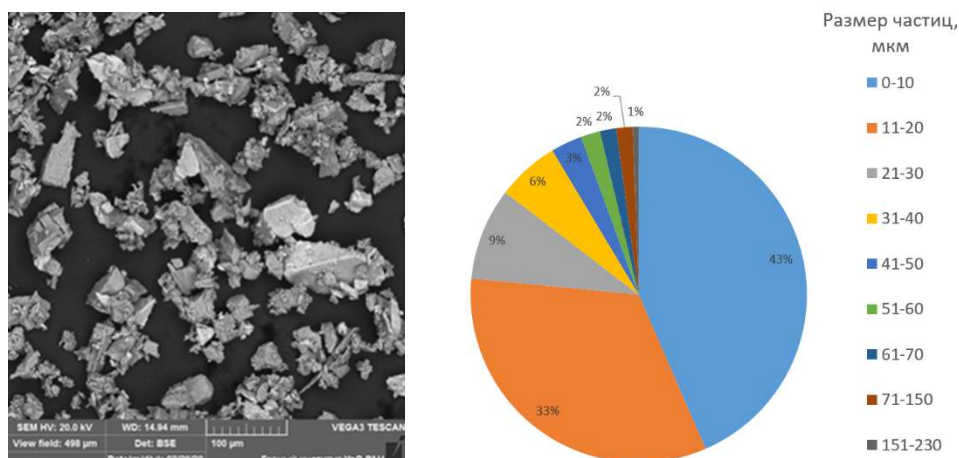


Рисунок 19 – а) Фотография соляных частиц из пробы под микроскопом, б) процентное содержание частиц по размерам в пробе

В результате замера размеров 699 случайных частиц соляной пыли были получены следующие данные: максимальный размер частицы 231 мкм (0,14 % в пробе), минимальный – 3 мкм (7,87% в пробе). Преобладающий размер частиц в пробе 0-10 мкм (43%), процентное содержание частиц размером более 50 мкм (5,58 %). Аналогичные данные получены в каждой замерной точке.

Еще один специальный натурный эксперимент был проведен в условиях тупиковой выработки длиной 150 м, сечением 15,6 м<sup>2</sup>. В забое выработки находился непрерывный источник пылевыделения (его роль выполнял добычной комбайн). В тупиковую часть при помощи вентиляционного става нагнетался воздух, в количестве 2,5 м<sup>3</sup>/с, таким образом запыленный воздух двигался к устью выработки со скоростью 0,16 м/с, относительная влажность воздуха 40 %. Ближе к устью тупиковой выработки (где наблюдалось устойчивое продольное движение воздуха) были выбраны 7 точек, расположенных через каждые 10 м. В каждой точке проводилось измерение массовой концентрации пыли. Из рисунка 20 видно, как происходит падение концентрации пыли по мере удаления от источника пылеобразования. Падение концентрации происходит монотонно, по слабо нелинейному закону.

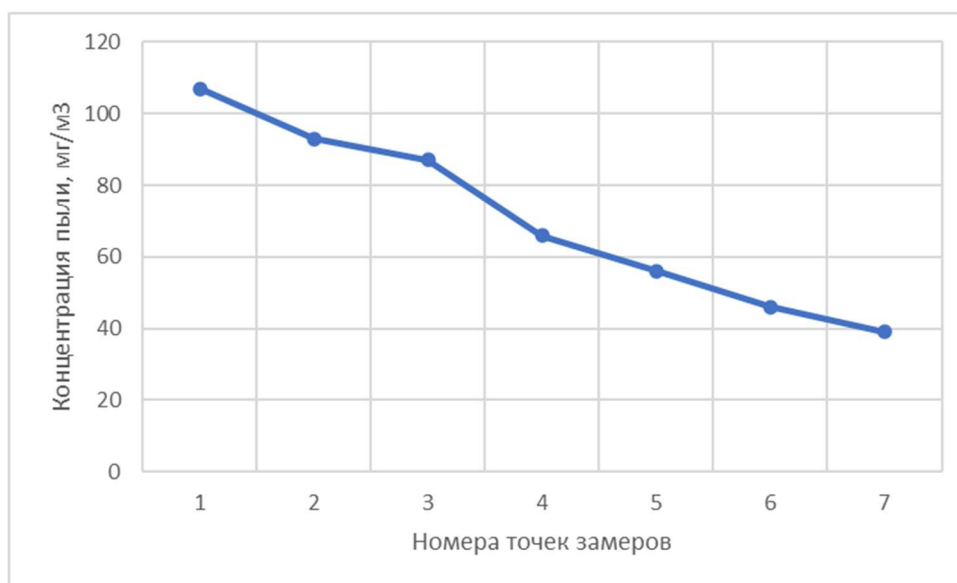


Рисунок 20 – Изменение массовой концентрации пыли по мере удаления от источника пылеобразования

Полученные данные использовались для определения коэффициента осаждения  $\lambda$  частиц соляной пыли в движущемся потоке воздуха и вывода аналитической формулы, описывающей этот процесс. В формуле для коэффициента осаждения  $\lambda$  были учтены эмпирические множители, полученные в результате проведения многопараметрического



численного моделирования и последующего поиска аппроксимирующих функций для полученных численных зависимостей.

В настоящей работе найдено два эмпирических множителя, позволяющих учесть как оседание частиц аэрозоля вследствие их коагуляции, так и, оседание частиц аэрозоля вследствие конденсации влаги на них:

$$\lambda = 0,17 \frac{\pi^2 D_T}{h^2 V_x} F_C F_\varphi, \quad (31)$$

$$F_C = 1 + 0,0075 (h^2 C_0)^{0,67}, \quad (32)$$

$$F_\varphi = 1 + 0,0038 (h^2 \Delta\varphi)^{1,8}. \quad (33)$$

Здесь  $C_0$  – начальная концентрация аэрозоля, мг/м<sup>3</sup>;  $\Delta\varphi$  – разница между фактической относительной влажностью воздушного потока и критической влажностью, %. Предполагается, что, если фактическая относительная влажность воздушного потока меньше критической влажности, то  $\Delta\varphi = 0$ .

На рисунке 21 представлен сравнительный анализ формулы (31) и результатов экспериментальных измерений массовой концентрации пыли.

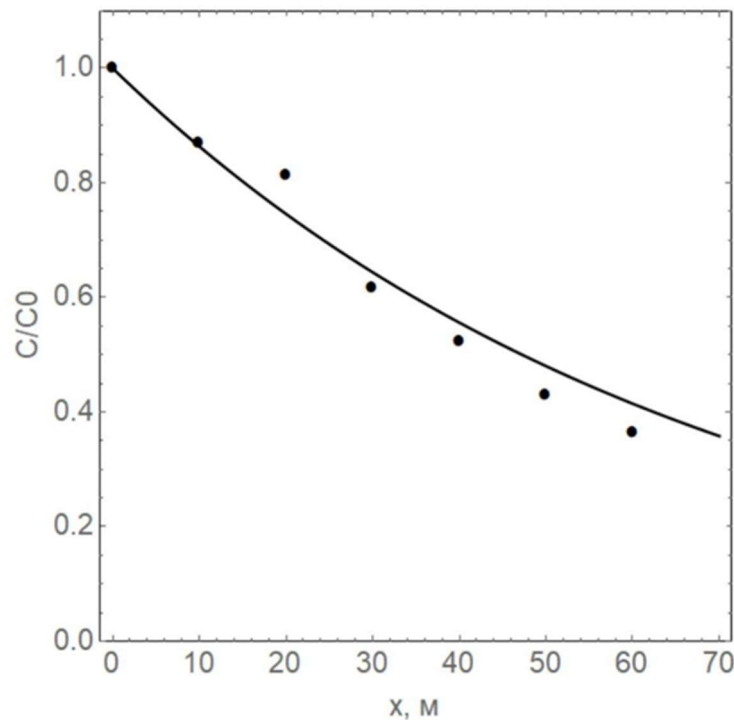


Рисунок 21 – Изменение средней концентрации аэрозоля по длине горной выработки: сплошная линия – аналитическая модель, точки – данные натурального эксперимента

Помимо экспериментальных исследований процессов оседания пыли проведены натурные эксперименты, позволяющие определить зависимость генерируемой массовой концентрации пыли от производительности комбайнового комплекса, и тем самым определить функцию пыления  $F$ .

В соответствии с общими законами физических процессов и их математических описаний функцию пыления (источника пыли)  $F$  можно задать в специально образованных узлах сети в виде:

- либо фиксированного потока воздуха  $q$  с определенной концентрацией пыли  $C$ , что дает для стационарных задач

$$F = qc, \text{ мг/с}, \quad (34)$$

- либо определенную концентрацию пыли  $C$ , которую удобно обозначить через  $\Delta C$ .

Смысл выбора такого обозначения состоит в том, что если до данного узла средняя по сечению выработки концентрация была равна  $C^+$ , то в ветвь, следующую за данным узлом, поступает воздух с другой концентрацией  $C^-$ , для которой справедливо элементарное равенство

$$C^- = C^+ + \Delta C, \text{ мг/м}^3. \quad (35)$$

Такой способ задания функции пыления оказывается более удобным, особенно для описания нестационарных процессов или при решении стационарных процессов итерационным способом, поскольку на каждом шаге по времени мы можем пересчитывать концентрации пыли с учетом и приноса пыли потоком, и с учетом пыления.

Для решения конкретных задач нужно знать значение «прироста пыли»  $\Delta C$ . Заметим, что  $\Delta C$  инструментально относительно несложно определить в натурном эксперименте. Определим  $\Delta C$  для двух основных источников пыления – тупиковых комбайновых проходческих забоев и для лав при столбовой системе разработки.

Существует эмпирическая формула для определения средней запыленности воздуха ( $\text{мг/м}^3$ ) на рабочем месте машиниста комбайна для тупиковых выработок, проходимых комбайном, полученная в работах классиков рудничной аэрологии

$$\Delta \bar{C} = \Delta \bar{C}_{30\%} \exp\left(0.3 - \frac{\varphi}{100}\right), \quad (36)$$

$$\Delta \bar{C}_{30\%} = 250\bar{J}. \quad (37)$$

Здесь  $\Delta \bar{C}$  – прирост концентрации пыли при произвольной относительной влажности воздуха,  $\text{мг/м}^3$ ;  $\bar{J}$  – средняя производительность комбайна, т/мин;  $\Delta \bar{C}_{30\%}$  – прирост концентрации пыли при относительной влажности воздуха 30 %;  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %, а коэффициент 250 имеет размерность и отражает эмпирическую взаимосвязь между средней по забою концентрацией соляной пыли  $\Delta \bar{C}_{30\%}$  и средней производительностью комбайна  $\bar{J}$ .

Учитывая, что способ отбойки руды проходческо-очистными комбайнами и связанного с ним пыления принципиально не изменился, данная формула может и сегодня

использоваться при решении сетевых задач проветривания численными методами.

Однако формулы (36) и (37), (особенно коэффициент 250) не отражают картину пыления при работе комбайнов в лавах (длинных очистных забоях), нашедших применение на Старобинском и Петриковском месторождениях калийных солей.

Поэтому для определения  $\Delta\bar{C}$  нами были проведены специальные натурные исследования зависимости генерирования массовой концентрации пыли от производительности комбайна комплекса в длинном очистном забое.

Основываясь на полученных данных, можно вывести эмпирическую зависимость для определения средней запыленности воздуха, формирующейся при работе добычного комбайна в длинном очистном забое.

$$\Delta C_{30\%} = 196J + 627, \text{ мг/м}^3, \quad (38)$$

$$\Delta\bar{C} = \Delta\bar{C}_{30\%} \exp\left(0.3 - \frac{\varphi}{100}\right), \text{ мг/м}^3. \quad (39)$$

Значения, полученные по данным формулам, могут быть использованы в качестве исходных данных для решения сетевой задачи.

Разработанная модель реализована в качестве расчетного модуля для программного комплекса АэроСеть. На рисунке 22 представлен пример расчета распределения пыли от источника пыления.

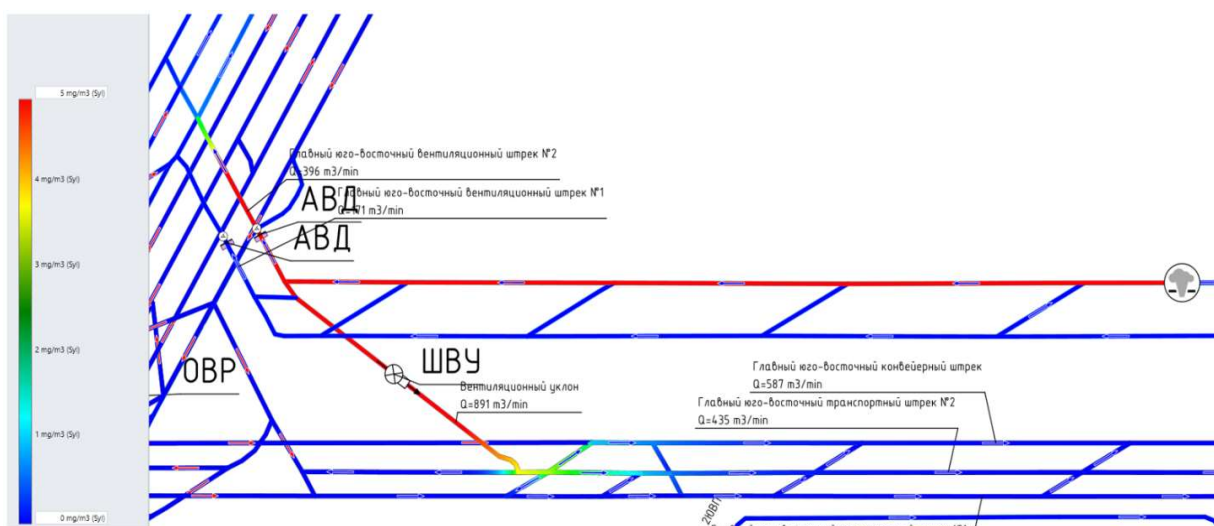


Рисунок 22 – Пример расчета распределения пыли от источника пыления

Расчетный модуль позволяет прогнозировать распространение пыли от источника пыления в зависимости от интенсивности источника и условий, в которых он располагается.

Селективная выемка полезного ископаемого в лавах рудников Старобинского месторождения, сопровождающаяся закладкой глинисто-галитового слоя в выработанное пространство, формирует наиболее сложные условия на рабочих местах в длинных очистных забоях. Работа установок механической закладки меняет схему движения воздушных потоков лаве за счет эжектирования воздуха потоком выбрасываемой глинисто-соляной породы. При этом образуются частично замкнутые контуры воздуха. В результате их работы происходит опрокидывание струи воздуха на различных участках лавы. Задача снижения запыленности становится сетевой, а наличие замкнутых воздушных контуров является одной из причин ухудшения пылевой обстановки на рабочих местах.

Нейтрализация негативного влияния воздушных контуров возможна за счет увеличения скорости движения воздуха в лаве до диапазона 1,4–2 м/с в комплексе с уменьшением расстояния между секциями механизированной крепи. Кроме того, для снижения пылеобразования необходимо использовать увлажнение горной массы в момент ее выхода из раструба «метателя».

Сложная пылевая обстановка складывается в вентиляционном стволе из-за интенсивного пылевыведения в процессе загрузки скипа в дозаторной камере (при размещении ВГП на поверхности) и в процессе разгрузки скипа в приемный бункер, во время которого в ствол поступает большое количество просыпей руды. Хотя исходящие струи с горизонта (из-за осаждения пыли в протяженных выработках) содержат незначительное количество пылевого аэрозоля (средняя концентрация пыли в исходящем потоке западного крыла составляет 5,4 мг/м<sup>3</sup>, восточного крыла – 8 мг/м<sup>3</sup>, в выработке чистки зумпфа 5 мг/м<sup>3</sup>).

Наличие соляного аэрозоля в скипо-вентиляционном стволе приводит к образованию соляных наростов на элементах армировки по всей глубине стволов. Величина соляных наростов достигает 0,5 м. Начиная с -50 м яруса соляные наросты начинают образовываться на нижней части расстрелов.

Разработанная пространственная модель вентиляционного ствола позволила корректно смоделировать аэродинамические процессы обтекания расстрелов воздушными потоками. Проведенные расчеты показали, что высота аэродинамической тени (области со скоростями воздуха 0–1,5 м/с), образующейся над расстрелом, не оборудованным обтекателем, составляет 750–850 мм. В этой области образуются два независимых вихря со скоростями движения воздуха в них близкими к нулю.

Предложено в условиях скиповых стволов калийного рудника использовать сухие пылеуловители (оснащенные системами самоочистки) в местах разгрузки скипов в приемный бункер. Помимо этого, использование обтекателя треугольной формы снижает

потерю давления в стволе на 49 %. Кроме того, применение обтекателей на расстрелах приведет к замедлению образования соляных наростов. А размещение вентиляторов главного проветривания (на скиповых стволах) в подземных условиях позволяет создать избыточное давление в зоне разгрузки скипов, что минимизирует выделение пыли из приемного бункера.

Тем самым выше были рассмотрены основные процессы формирования пылевой обстановки в горных выработках калийных рудников – от мест генерирования пыли до мест ее выноса из рудника.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе на базе многолетних теоретических исследований и натуральных наблюдений, выполненных на калийных рудниках Верхнекамского, Старобинского и Гремячинского месторождений калийных солей, разработаны научные основы и технические решения снижения концентрации соляного аэрозоля на рабочих местах добычных забоев путем повышения эффективности использования свежего воздуха, подаваемого для проветривания, и тем самым решена важная техническая проблема калийной промышленности при подземной добыче полезного ископаемого.

Установлено, что процессы перемешивания, характерные для нагнетательного способа проветривания тупиковых комбайновых забоев увеличивают объемы загрязненного воздуха до объема всей проветриваемой области, что влечет за собой увеличение время проветривания и невозможность обеспечения допустимых концентраций.

Наоборот, связанные с всасывающим способом проветривания процессы вытеснения оказываются более эффективными, рациональными, являются более ресурсосберегающими. Всасывающий способ проветривания позволяет локализовать пылевое облако в районе пыления, перераспределить содержание пыли в воздушном пространстве тупиковой комбайновой выработки, и тем самым снижать концентрацию пыли в отдельных зонах, в том числе и в зонах дыхания и местонахождения машиниста комбайна. При этом управление степенью локализации осуществляется изменением производительности всасывающего вентилятора.

Методами математического моделирования показано, что даже в рамках стационарной модели, влияние нагретых электродвигателей и их струйного охлаждения приводит к повышенному вихреобразованию, что не позволяет проявиться эффекту вертикальной стратификации метано-воздушной смеси с образованием слоевых скоплений. Все это делает применение всасывающего способа проветривания безопасным при наблюдающихся интенсивностях газовыделения горючих газов, подаче количества свежего воздуха хотя бы по минимальной скорости и общей нестационарности пульсирующих структур вихревых потоков.

Выявлено, что при применении столбовой системы разработки наиболее сложная пылевая обстановка формируется в процессе селективной выемке полезного ископаемого с применением установок механической закладки. Для снижения пылеобразования в селективной лаве предложено использовать элементы системы гидрообеспыливания для увлажнения горной массы в момент ее выхода из раструба «метателя».

Установлено, что в условиях скиповых стволов калийного рудника целесообразно использовать сухие пылеуловители (оснащенные системами самоочистки), устанавливаемые в местах разгрузки скипов в приемный бункер. Кроме того, размещение вентиляторов главного проветривания (на скиповых стволах) в подземных условиях позволяет создать избыточное давление в зоне разгрузки скипов, что минимизирует выделение пыли из приемного бункера.

Выполненные экспериментальные исследования динамики соляного аэрозоля в протяженных горных выработках позволили определить все основные параметры уравнений конвективно-диффузионного переноса и тем разработать сетевую модель распространения пыли, пригодную для численных расчетов.

Таким образом, на основе проведенных научных исследований решена крупная научно-производственная проблема по снижению концентраций соляной пыли на рабочих местах горных выработок калийных рудников.

**Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:**

1. Проанализировано текущее состояние вопросов запыленности калийных рудников. Отмечено, что последние 50 лет пылевая обстановка на рабочих местах постоянно усугубляется по причине наращивания объемов добычи и внедрения производительного оборудования. Особенности соляного аэрозоля не позволяют применять классические способы борьбы с пылью.
2. Разработан перспективный подход к решению борьбы с пылью в горных выработках калийных рудников на основе перераспределения воздушных потоков с превалированием процессов выноса (переноса) пыли над процессами смешения разно загрязнённых объемов.
3. В действующих рудниках выполнены экспериментальные исследования динамики микроциркуляционных потоков пылевоздушных смесей в пространстве тупиковой выработки при различных способах проветривания.
4. Разработана математическая модель тупиковой комбайновой выработки, учитывающая нахождение и работу комбайнового комплекса, нагрев приводов комбайна и работу воздушного охлаждения приводов. Произведена оценка эффективности процессов смешения и переноса при различных способах

проветривания с учетом принципов зонирования рабочего пространства тупиковых забоев.

5. Разработаны технические решения по повышению эффективности использования воздуха, поступающего на проветривание рабочей зоны и снижению концентрации вредных примесей на рабочих местах, основанные на применении всасывающего способа проветривания тупиковых забоев.
6. Произведена оценка безопасности и эффективности всасывающего способа проветривания при различных углах наклона горных выработок при условии выделения в рабочую зону горючих и серосодержащих газов.
7. Предложены технические решения по снижению массовой концентрации соляного аэрозоля в длинных очистных забоях, а также в поверхностном разгрузочном комплексе.
8. Выполнены экспериментальные исследования динамики и спектрального состава сильвинитового аэрозоля при движении по в сети горных выработок, позволившие определить коэффициенты осаждения и генерации соляного аэрозоля в горных выработках калийного рудника.
9. На основе экспериментальных исследований динамики и спектрального состава сильвинитового аэрозоля разработана сетевая модель движения соляных аэрозольных частиц в системе горных выработок, позволяющая производить оценку дальности распространения соляного аэрозоля в вентиляционной сети горных выработок.
10. На основе сетевой модели разработан модуль программного комплекса «Аэросеть», позволяющий моделировать распространение сильвинитовой пыли по шахтной вентиляционной сети.

**СПИСОК РАБОТ,  
опубликованных автором по теме диссертации**

**публикации в изданиях, утвержденных Высшей аттестационной комиссией при  
Министерстве образования и науки Российской Федерации; в изданиях,  
входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science**

1. Исаевич, А.Г. Изучение миграции пылевого аэрозоля в условиях возникновения избыточного давления в помещениях башенного копра /А.Г. Исаевич, Н.А. Трушкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 4. – С. 195–200.
2. Зайцев, А.В. Исследование пылевой динамики в загрузочных комплексах при изменении схемы вентиляции рудника / А.В. Зайцев, Н.А. Трушкова, Е.Л. Гришин, А.Г. Исаевич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 160–163.
3. Левин, Л.Ю. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов / А.Г. Исаевич, М.А. Семин, Р.Р. Газизуллин // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 72–75.
4. Исаевич А.Г. Исследование пылевой обстановки в условиях калийного рудника, опыт снижения запыленности атмосферы рабочих мест /А.Г. Исаевич, Н.А. Трушкова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. –№ 4. – С. 60–74.
5. Файнбург, Г.З Анализ микроциркуляционных потоков между микроронами в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания / Г.З. Файнбург, А.Г. Исаевич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3. – С. 58–73.
6. Мальцев, С.В. Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения / С.В. Мальцев, Б.П. Казаков, А.Г. Исаевич, М.А. Семин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 2. – С. 46–57.
7. Исаевич, А.Г. Особенности формирования пылевой обстановки в комбайновом забое глубокого калийного рудника / А.Г. Исаевич, И.И. Чайковский, И.В. Поляков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 4. –С. 539–550.
8. Файнбург, Г.З. Повышение эффективности проветривания тупиковых комбайновых выработок калийных рудников по пылевому фактору / Г.З. Файнбург, А.Г. Исаевич,



- А.В. Зайцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 8. – С. 38–50.
9. Казаков, Б.П. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников / Б.П. Казаков, Е.В. Колесов, Е.В. Накаряков, А.Г. Исаевич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 5–33.
  10. Исаевич, А.Г. Перспектива снижения запыленности в очистном забое и увеличения коэффициента извлечения в условиях калийного рудника при камерной системе разработки / А.Г. Исаевич, А.В. Шалимов, М.А. Александрова // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 12. – С. 37–43.
  11. Семин, М.А. Исследование оседания пыли калийной соли в горной выработке / М.А. Семин, А.Г. Исаевич, С.Я. Жихарев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 2. – С. 178–191.
  12. Исаевич, А.Г. Экспериментальное исследование динамики изменения фракционного состава соляного аэрозоля в комбайновом забое калийного рудника / А.Г. Исаевич, Г.З. Файнбург, С.В. Мальцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 1. – С. 60–71.
  13. Исаевич, А.Г. О неэффективности нагнетательного способа проветривания при решении задачи нормализации пылевой обстановки в тупиковом забое калийного рудника / А.Г. Исаевич, М.А. Семин, Г.З. Файнбург, М.А. Александрова // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 6. – С. 52–59.
  14. Семин, М.А. К вопросу о расчете распространения вредных примесей в системах горных выработок / М.А. Семин, А.Г. Исаевич, Н.А. Трушкова, С.А. Бублик, Б.П. Казаков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. № 2. – С. 82–93.
  15. Суханов А.Е., Использование перекрестной схемы резания для снижения пылевидных и необогатимых фракции при механизированной добыче калийной руды / А.Е. Суханов, Д.И. Шишлянников, А.Г. Исаевич // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 60–69.
- публикации в других изданиях**
16. Semin, M. Analysis of Methane–Air Mixture Dynamics in a Dead-End Drift Ventilated Using an Exhaust System / M. Semin, A. Isaevich // Computation. – 2022. Т. 10. – №. 12. Статья № 212.

17. Isaevich, A. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes / A. Isaevich, M. Semin, L. Levin, A. Ivantsov, T. Lyubimova // Sustainability. – 2022. Т. 14. – № 5: 3030.
18. Исаевич, А.Г. Влияние технологических процессов на формирование пылевоздушных потоков в очистном забое /А.Г. Исаевич // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2007. – Пермь, 2008.
19. Исаевич, А.Г. Механизм образования соляных отложений в вентиляционном стволе в условиях восходящего воздушного потока и способы снижения вероятности их образования /А.Г. Исаевич, // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сессия. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2009 г. – Пермь, 2010. – С. 194–196.
20. Газизуллин, Р.Р. Численное моделирование процессов выноса вредных примесей рудничной атмосферы при проветривании тупиковых выработок различными способами / Р.Р. Газизуллин, А.Г. Исаевич, Л.Ю. Левин, // Научные исследования и инновации. – Пермь, ПГТУ. – 2011. –Т. 5. – №2 – С. 127–129.
21. Исаевич, А.Г. Исследование распространения пылевого аэрозоля в башенном копре скипового ствола при расположении главной вентиляторной установки в подземных условиях /А.Г. Исаевич, Н.А. Трушкова // Научный журнал. Научные исследования и инновации. Горное дело. – Пермь, ПГТУ. – 2011. – Т. 5. – №1.
22. Исаевич, А.Г. Исследование процессов распределения пылевоздушных потоков в башенном копре и разработка способов обеспыливания участка разгрузки скипов при размещении главных вентиляторных установок в подземных условиях/А.Г. Исаевич // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Сборник научных трудов. Вып. 9. – Пермь, 2011. – С. 244–246.
23. Исаевич, А.Г. Снижение запыленности атмосферы раб очей зоны при работе комбайнового комплекса с барабанным исполнительным органом /А.Г. Исаевич // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. – Пермь, 2015. – С. 264–266.
24. Исаевич, А.Г. Актуальные вопросы организации проветривания тупиковых выработок /А.Г. Исаевич // В сборнике: Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. – Пермь, 2017. – С. 292–297.
25. Исаевич, А.Г. Исследование пылевой обстановки на рудниках ОАО "Беларуськалий", опыт снижения запыленности атмосферы рабочих мест /А.Г. Исаевич, Л.Ю. Левин // В

- сборнике: стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. – Пермь, 2018. – С. 249–253.
26. Файнбург, Г.З. Взаимосвязь физических механизмов, математических моделей и технических способов проветривания тупиковых горных выработок / Г.З. Файнбург, М.А. Семин, А.Г. Исаевич // Горное эхо. – 2020. № 3 (80). – С. 131–137.
27. Файнбург, Г.З. Новые парадигмальные подходы к управлению динамикой пылевой обстановки при механизированной добыче калийной руды / Файнбург, Г.З., А.Г. Исаевич // Горное эхо. – 2021. – № 2 (83). – С. 106–112.
28. Исаевич, А.Г. Обоснование применимости всасывающего способа проветривания для нормализации пылевой обстановки / А.Г. Исаевич // Горное эхо. – 2022. № 1 (86). – С. 133–139.