Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН)

На правах рукописи

Hlcent-

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»

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

> Научный консультант: чл.- корр. РАН, д-р техн. наук Л. Ю. Левин

СОДЕРЖАНИЕ

BBE	ЕДЕНИЕ
1.	СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ14
1.1	Пыль как неотьемлемый компонент рудничной атмосферы14
1.2	Характеристика пыли, образующейся при разрушении горных пород в процессе
добь	ычи руды в калийных рудниках18
1.3 горн	Влияние запыленности рудничной атмосферы калийных рудников на здоровье порабочих
1.4	Факторы производственной среды, усугубляющие негативное воздействие соляной
пыл	и на организм горнорабочих32
1.5	Экспериментальные исследования пылевой обстановки в калийных рудниках35
1.6	Применяемые и потенциально возможные способы борьбы с пылью на калийных
рудн	никах
1.7	Модели турбулентного конвективно-диффузионного переноса пыли в протяженной
горн	юй выработке49
1.8	Трехмерные модели турбулентного движения многофазных потоков, содержащих
аэро	зольные частицы
1.9	Цель и задачи исследований55
2.	МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СОЛЯНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ
ЧАС	СТИЦ В СИСТЕМЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК
2.1	Сетевая модель конвективно-диффузионного переноса соляной пыли
2.2	Пространственное распределение пыли в протяженных горных выработках и
опре	еделение коэффициента осаждения60
2.3	Математическое описание генерирования пылевого аэрозоля при различных
спос	собах добычи калийных солей и определение источника пыления
2.4	Программная реализация численного решения сетевой задачи движения соляных
аэро	зольных частиц в системе горных выработок80
2.5	Выводы

3.	РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ
ПЫЈ	ІЕВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ТУПИКОВОЙ КОМБАЙНОВОЙ
выр	АБОТКИ С УЧЕТОМ РАЗМЕЩЁННОГО ОБОРУДОВАНИЯ85
3.1	Взаимосвязь организации ведения горных работ и физических механизмов
техн	ических способов проветривания тупиковых горных выработок
3.2	Содержательная постановка проблемы научно-обоснованного выбора способа
пров	етривания тупиковой комбайновой выработки86
3.3	Обоснование выбора математической модели турбулентного тепломассопереноса
при	проветривании тупиковой комбайновой выработки90
3.4	Экспериментальные исследования параметров пылевоздушных потоков в тупиковом
комб	байновом проходческо-очистном забое
3.5	Верификация численного моделирования проветривания тупикового комбайнового
забо	ส111
3.6	Выводы
4.	ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПОТОКОВ
ПЫЈ	ІЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ ТУПИКОВОЙ КОМБАЙНОВОЙ
ПРО	ХОДЧЕСКО-ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ
ПРО	ВЕТРИВАНИЯ122
4.1	Физические процессы проветривания тупиковой комбайновой выработки122
4.2	Результаты численного моделирования процессов проветривания при использовании
нагн	етательного способа проветривания тупиковой комбайновой выработки126
4.3	Результаты численного эксперимента при использовании всасывающего способа
пров	етривания тупиковой комбайновой выработки с помощью штатной системы
пыле	сулавливания
4.4	Результаты численного эксперимента при использовании всасывающего способа
пров	етривания по оценке изменения места всасывания воздуха
4.5	Выводы152
5.	ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВСАСЫВАЮЩЕГО
СПС	СОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВОГО КОМБАЙНОВОГО ЗАБОЯ ПРИ
ВЫД	ЦЕЛЕНИЯХ ВЗРЫВООПАСНЫХ И ЯДОВИТЫХ ГАЗОВ

5.1	Проблема обеспечения безопасности при наличии выделений природных газов из
соля	ного горного массива калийных месторождений153
5.2	Исследование возможности образования застойных зон при применении
всас	ывающего способа проветривания тупиковой комбайновой выработки158
5.3	Исследование безопасности распространения метана и сероводорода в тупиковом
комб	байновом забое при всасывающем способе проветривания161
5.4	Выводы
6.	ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СОЛЯНОЙ ПЫЛИ ПРИ
СЕЛ	ЕКТИВНОЙ ВЫЕМКЕ КАЛИЙНОЙ РУДЫ В ДЛИННЫХ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ
(ЛАI	BAX)
6.1	Анализ процессов воздухораспределения и пылеобразования в длинных очистных
забо	ях (лавах)
6.2	Экспериментальные исследования пылевой обстановки в лаве, ведущей селективную
выем	лку188
6.3	Разработка технических решений по снижению концентрации пыли в рабочей зоне
лавы	I, ведущей селективную выемку194
6.4	Разработка эффективного способа борьбы с пылью в атмосфере лавы,
осуп	цествляющей селективную выемку201
6.5	Выводы
7.	ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СОЛЯНОЙ ПЫЛИ В СКИПО-
BEH	ТИЛЯЦИОННЫХ СТВОЛАХ ПРИ ПОДЪЕМЕ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО207
7.1	Исследование процессов пылеобразования в скипо-вентиляционных стволах207
7.2	Анализ образования пылесолевых наростов на элементах крепи скипо-
вент	иляционного ствола
7.3	Исследование процессов витания соляного аэрозоля в вертикальном воздушном
пото	ке и образования соляных наростов на элементах армировки ствола
7.4	Исследование процессов роста соляных образований в стволах
7.5	Создание пространственной модели вентиляционного ствола
7.6	Результаты численного эксперимента по изучению аэродинамических теней,
созд	аваемых армировкой и расстрелами ствола

7.7	Исследование распространения соляного аэрозоля в условиях сложной геометрии	1
аэрод	цинамической системы «башенный копер – атмосфера»	.228
7.8	Исследование возможных способов борьбы с соляной пылью внутри копра	.234
7.9	Реализация технических решений по снижению концентрации пыли в башенном	
копр	е скипо-вентиляционного ствола	.241
7.9	Выводы	.245
ЗАК.	ЛЮЧЕНИЕ	.246
СПИ	СОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	.249

введение

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 растет, 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 мг/м³ характерно и для камерной системы разработки, широко применяемой на Верхнекамском и Гремячинском месторождениях (характеризуется ведением работ в тупиковых комбайновых проходческоочистных забоях), и для столбовой системы разработки длинными очистными забоями (лавами), которая нашла применение на Старобинском месторождении, типичные фактические концентрации пыли достигают значений в 2500-3000 мг/м³ воздуха, т.е. 500-600 ПДК. В некоторых случаях, например, в условиях рудника Гремячинского ГОК значения концентрации пыли могут превышать 5000 мг/м³ воздуха (1000 ПДК). При таких значениях запыленности использование средств индивидуальной защиты становится неэффективным, так как применяемые сегодня респираторы рассчитаны на концентрации 50-400 мг/м³. 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. Однако 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:

- 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.
- 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.

- Предложить технические решения по снижению массовой концентрации соляного аэрозоля в длинных очистных забоях (лавах), а также в поверхностном разгрузочном комплексе.
- 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 для аналитического 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:

- 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:

- Разработана трехмерная математическая модель турбулентного движения воздушно-соляной и бинарной газовой смеси в тупиковой комбайновой выработке, учитывающая расположение и работу двигателей комбайнового комплекса.
- 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.
- 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 аналитического 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: AAAA-A18-118040690029-2), 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 «Промышленная конференции 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 научнопрактической 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».

Автор выражает глубокую признательность д-ру техн. наук, чл.-корр. РАН Л.Ю. Левину и д-ру техн. наук, профессору Г.З. Файнбургу за советы в формировании научного направления работы и создание уникальной благоприятной среды для проведения исследований, д-ру физ.-мат. наук, профессору Т.П. Любимовой и д-ру техн. наук М.А. Семину, а также канд. физ.-мат. наук А.О. Иванцову за помощь в разработке трехмерных математических моделей турбулентного тепломассопереноса с учетом пылевой и газовой фракций и их программной реализации.

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.

1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Пыль как неотъемлемый компонент рудничной атмосферы

Добыча твердых полезных ископаемых невозможна без их разрушения, а разрушение горных пород неизбежно ведет их к размельчению вплоть до пылевидных фракций, и соляные горные породы калийных месторождений не исключение.

Самыми крупными калиеносными бассейнами в мире являются Верхнекамский в России и Саскачеванский в Канаде, на долю которых приходится 82.2% учтенных мировых запасов [31]. Сегодня на территории России и Беларуси разрабатывается два крупнейших месторождения калийных солей - Верхнекамское, расположенное на Урале, и Старобинское, расположенное в Беларуси.

Увеличение объемов добычи происходит как за счет ввода новых рудников, так и за счет применения современного высокопроизводительного оборудования. Добывающие предприятия стремятся внедрять максимально высокопроизводительные добычные комбайны, что приводит к увеличению количества «вредностей», выделяемых в атмосферу рабочей зоны при разрушении массива горных пород, а также при транспортировке уже отбитого полезного ископаемого.

Пыль, образующаяся при отбойке и транспортировке, включая подъём «на гора», полезного ископаемого является одной из таких «вредностей». Как показывает практика, увеличение запыленности рудничной атмосферы выше предельно допустимых значений ПДК (5 мг/м³) [121] наблюдается не только в рабочих зонах, но также в главных и панельных выработках (таб. 1.1) [94].

Объект наблюдений	Тип транспорта						
	Электро	возный	Конвейерный				
	зима	лето	зима	Лето			
Околоствольный двор	13–25	3–5	15–25	15-20			
Главный транспортный штрек	4–7	3-5	40–50	7–8			
Панельные транспортные штреки	4–6	3 – 5	50–60	7–9			
Воздух, поступающий в рабочие зоны	15–25	3 – 7	50–60	7–9			
Погрузочные пункты и узлы перегрузки	50-300	30–100	100–150	30–50			

Таблица 1.1. Уровень запыленности атмосферы на Верхнекамском месторождении, мг/м³

При добыче калийной соли применяют два основных типа систем разработки: камерную – в основном на Верхнекамском и Гремячинском месторождениях, и столбовую система разработки длинными очистными забоями - на Старобинском месторождении. Обе системы разработки характеризуются высокими значениями концентрации соляного аэрозоля в атмосфере рабочих зон - до 5000 мг/м³ (1000 ПДК) при камерной системе разработки и до 2500 мг/м³ (500 ПДК) при столбовой. В дозаторных камерах фиксируются значения, превышающие 10000 мг/м³ (2000 ПДК). Однако стоит отметить, что постоянных рабочих мест в дозаторных камерах нет, и опасность высокой запыленности в них заключается в возможности выноса пыли на свежую струю.

Изучению вопроса высокой запыленности рудничной атмосферы калийных рудников посвящены работы видных ученых: Медведева И.И. [92, 93, 95, 98, 96, 97, 99, 100, 101], Красноштейна А.Е. [71, ,72,73], Бухарова И.Н. [14], Кравец В.И. [65, 66], Казакова Б.П. [46, 47, 48], Овсянкина А.Д [115,114], Сметанина М.М., Файнбурга Г.З., Косяченко Г.Е. и др. [68, 106, 107, 108, 120, 126, 127, 131, 142, 143, 152, 167, 168]. В своих работах авторы приводят результаты экспериментальных исследований запыленности атмосферы калийных рудников Верхнекамского, Старобинского, Прикарпатского месторождений, выявляют места с высокой запыленностью атмосферы рудников, предлагают различные способы снижения концентрации пыли, отмечают, что эффективная борьба с соляной пылью в первую очередь возможна при использовании свойств ее гигроскопичности.

Основными источниками поступления пыли в атмосферу калийного рудника являются: разрушение горного массива исполнительными органами проходческих и добычных комбайнов; перегрузка (пересып) руды с конвейера на конвейер и процесс подъема полезного ископаемого, включающий в себя загрузку руды в скип, подъем руды в скипе и выгрузку руды из скипа в приемный бункер.

Разрушение горного массива исполнительными органами проходческих и добычных комбайнов. 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-перегружатель. В меньшей степени образование пыли происходит при перегрузке руды из бункераперегружателя в самоходной вагон, а также при движении вагона за счет сдува пыли с поверхности руды и взметывания ранее осевшей пыли с поверхности выработки, особенно с почвы.

Технологические циклы – отбойка руды с ее погрузкой в бункер-перегружатель и перегрузка руды из бункера-перегружателя в самоходный вагон порождают динамику и цикличность вентиляционных процессов, в первую очередь, пыления.

Общая картина динамики запыленности (аналогично и загазованности) в забое зависит от соотношения времени загрузки бункера-перегружателя и времени челнокообразного движения самоходного вагона. Соотношение этих времен определяет время работы комбайна и время его простоя. Во время работы комбайна концентрация пыли (и газа) в забое растет, во время простоя падает. Чем дольше непрерывно работает комбайн, тем выше результирующие средние значения загрязненности [42, 45].

Свою негативную лепту в динамику качества воздуха в зоне дыхания машиниста комбайна (и машиниста самоходного вагона) вносит непрерывное изменение расстояния между грудью забоя и концом вентиляционного става при нагнетательном способе проветривания из-за непрерывного движения комбайна на забой.

Такова ситуация в тупиковых комбайновых проходческо-добычных выработках.

Если рассматривать пылевую обстановку в лавах – в длинном очистном забое, то наиболее сложная ситуация наблюдается в лавах, ведущих селективную выемку полезного ископаемого. Особенностью данного технологического процесса является то, что слои глинисто-соляной породы вынимаются отдельно, при этом порода не транспортируется на поверхность, а при помощи установок механической закладки забрасывается в выработанное пространство, что вызывает выделение огромного количества пыли.

Кроме того, работающие установки механической закладки являются своеобразными источниками тяги и создают воздушные рециркуляционные контуры движения запыленного воздуха в пределах рабочего пространства лавы, что еще больше усугубляет пылевую обстановку. Установлено, что при выемке сильвинитового слоя средняя запыленность атмосферы рабочей зоны составляет 593 мг/м³ (119 ПДК), при выемке глинисто-галитового слоя - 804 мг/м³ (161 ПДК).

Перегрузка (пересып) руды с конвейера на конвейер. Процесс пересыпа руды с конвейера на конвейер рассмотрим на примере разгрузочного комплекса рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий». На рисунке 1.1 представлена схема расположения узла магистральных конвейеров (с точками замеров концентрации пыли) на участке перегрузки руды в северный и южный бункеры.



Рисунок 1.1 – Схема расположения узла магистральных конвейеров

В таблице 1.2 представлены результаты замеров концентрации пыли в узле магистральных конвейеров.

Таблица 1.2—	Результаты	измерения	концентрации	пыли в у	зле магистр	альных
конвейеров						

Номер замерной точки	Температура, ⁰ С	Влажность, %	Концентрация взвешенного аэрозоля, мг/м ³ (средняя)	Концентрация взвешенного аэрозоля, (количество ПДК)
1	26,2	58	155,4	31
2	26,4	59	315,5	63
3	26,7	56	83,3	16
4	27,6	46	85,1	17
5	27,1	45	265,0	53
6	27,8	44	240,6	48

Результаты замеров показывают более чем десятикратное превышение предельно допустимой концентрации пыли на этом участке.

Процесс подъема полезного ископаемого, включающий в себя загрузку руды в скип, подъем руды в скипе и выгрузку руды из скипа в приемный бункер. Скиповой подъем представляет собой совокупность загрузочных устройств и механизмов, расположенных на горизонте рудника и служащих для загрузки скипов, а также разгрузочных устройств скипов и подъемных машин, расположенных в башенных копрах. На дневной поверхности объекты скипового подъема входят в подсистему поверхностного комплекса, а именно, в подсистему башенных копров. Приемные бункеры расположены между отметками +42,6 и +30 м. Ниже вентиляционного горизонта расположены дозаторные камеры, в которых производится загрузка руды в скипы. Южная дозаторная расположена на отметке – 463,8 м, северная – на отметке – 446,8 м. Емкость дозаторной камеры соответствует емкости скипа.

В процессе обследования вентиляционных стволов, оборудованных скиповым подъемом, установлено, что существуют четыре основных процесса, в результате которых выделяется соляной аэрозоль:

- загрузка скипа в дозаторной камере;
- движение скипа по стволу;
- разгрузка скипа в приемный бункер, расположенный в копре.

В момент загрузки скипа также происходит срыв пыли с потока загружаемой руды. Часть пыли увлекается воздушным потоком вверх, однако скорость воздуха в стволе на данном участке не велика (0,35 м/с), поэтому крупная фракция и значительная часть мелкой оседают на армировке ствола, в зоне загрузки скипа, либо опускаются в зумпф.

В момент разгрузки скипа в приемный бункер происходит просыпь рудной мелочи, которая под действием силы тяжести, а также интенсивных потоков воздуха (внешние утечки воздуха) попадает в ствол и на нулевую отметку копра. Помимо этого, при разгрузке скипа происходит срыв потоками воздуха пыли с разгружаемой руды и поступление из бункера пылевого облака, образующегося там в результате избыточного давления, создаваемого разгружающейся рудой.

Необходимо отметить, что выделившаяся при разгрузке скипа пыль и просыпи лишь частично попадают на отметки +42 м и 0 м. Большая часть с воздушным потоком внешних утечек поступает в ствол. Мелкая фракция уносится в вентиляционный канал, крупная (более 3 мм), преодолевая силу воздушного потока, движущегося по стволу со скоростью 5,1 м/с, падает, оседая при этом на расстрелах.

Все вышесказанное наглядно показывает высокую степень запыленности рудничной атмосферы соляной аэрозолью и аэровзвесями крупнодисперсной пыли.

1.2 Характеристика пыли, образующейся при разрушении горных пород в процессе добычи руды в калийных рудниках

Вещественный состав. Состав пыли, образующейся в процессе добычи и транспортировки калийных солей, определяется составом пород, слагающих продуктивные пласты. В литературных источниках довольно подробно описаны физико-химические

свойства калийной и каменносоляной пыли [96, ,97, 99,100, 101, 103]. В таблице 1.3 приведены средние данные химического состава пластов и пыли по основным калийным месторождениям СНГ.

Таблица	1.3 —	Средние	данные	химического	состава	пластов	И	пыли	ПО	основным
калийны	м место	рождения	м СНГ							

	Содержание компонентов (%) по месторождениям								
Химический	Bepx	некамско	ому	Староби	инскому	Прика	Прикарпатскому		
cocras	пласт Красный II	пласт АБ	пласт В	II горизонт	Ш горизонт	Калушский рудник	Стебниковский рудник		
KCl	$\frac{21,70}{20,70}$	32,90 30,50	24,05 23,96	26,08 24,53	24,83 23,43	16,95 15,90	8,26 7,81		
NaCl	73,20 71,51	61,80 59,89	$\frac{12,14}{10,40}$	67,75 65,75	69,46 67,26	36,4 35,0	32,37 31,37		
K ₃ SO ₄						4,34 3,92	9,84 9,71		
MgSO ₄						22,20 20,85	23,84 23,54		
MgCl ₂	0,20 0,36	0,30 0,55	28,99 29,87	0,28 0,42	0,32 0,48	0,42 0,48			
CaSO ₄	3,30 2,48	3,10 2,12	0,95 0,63	0,96 1,02	0,89 1,04	4,50 3,67			
CaCl ₂				0,25 0,31	0,27 0,36		—		
Нерастворимый остаток	1,20 4,83	1,35 6,09	1,01 1,18	4,43 8,24	3,96 7,86	$\frac{17,70}{20,50}$	$\frac{16,4}{18,24}$		

Числитель – химический состав и содержание пластов, знаменатель – химический состав и содержание пыли.

Химический анализ показал, что главным компонентом в нерастворимом остатке пыли Прикарпатских рудников является SiO₂(62,86–75,17%), которая составляет 11,3 -19,6, % массы всей пылевой пробы.

Значительно меньше двуокиси кремния содержится в пыли Старобинских рудников. В состав нерастворимого остатка входит 11,4–20,3 % свободной SiO₂, что составляет 0,39– 0,9 % всей пылевой пробы [92].

На Верхнекамских рудниках в состав нерастворимого остатка пылевых проб входит свободная SiO₂ с содержанием на сильвинитовых пластах 0,02–2,73 %, на карналлитовых – 0,6 %. Содержание SiO₂ во всей пылевой пробе не превышает 0,2 %. Таким образом,

разрабатываемые пласты Верхнекамского и Старобинского месторождений не силикозоопасны. Пыли Прикарпатских рудников следует считать силикозоопасными.

Помимо SiO₂ в состав нерастворимого остатка входят оксиды железа (3–8 %), кальция (9–15 %) и магния (6–12 %). В нерастворимом остатке пыли Верхнекамского и Старобинского месторождений особенно велико (30–60 %) содержание веществ органического происхождения [103].

Исследования, выполненные в Горном институте УрО РАН в процессе изучения состава глинисто-галитовых слоев рудника 1 РУ Старобинского месторождения, показали, что аэрозоль, образующийся при выемке глинисто-галитовых слоев, содержит в своем составе большое количество глины, которая имеет сложный химический состав. Для определения химического состава пыли, образующейся при выемке глинисто-галитовых слоев, было выбрано две пробы. Первая проба – пылевой аэрозоль, состоящий из глины и галита. Вторая проба – пылевой аэрозоль, осевший на секциях крепи, т. е. примерный средний состав пыли, образующейся за полный цикл работы оборудования. Третья проба – 100% глины. Проведенный химический анализ выявил богатый вещественный состав глинистого слоя.

Основные результаты определения химического состава выбранных проб приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4—Результаты определения химического состава пыли 1 РУ Старобинского месторождения

	Содержание, мг/кг					
Элемент	Проба 1	Проба 2	Проба 3			
Алюминий	11380	6195	44470			
Барий	34	18,01	92,3			
Бериллий	0,16	0,11	0,487			
Бор	113,8	89,23	1059			
Ванадий	16,47	16,96	64,87			
Железо	7683	3700	23870			
Калий	36420	31280	32030			
Кальций	38480	20540	115800			
Кобальт	4,96	2,73	16,11			
Кремний	28583,1	16387,9	119579,4			
Лантан	5,01	3,52	21,33			
Литий	33,61	18,75	142,1			
Магний	10520	5814	33290			
Марганец	135,7	82,18	377,4			
Медь	12,34	12,78	31,89			

A LONOLL	Содержание, мг/кг					
Элемент	Проба 1	Проба 2	Проба 3			
Молибден	2,82	-	-			
Натрий	314700	332400	18210			
Никель	8,32	7,019	26,86			
Ртуть	0,03	0,04	0,06			
Свинец	4,04	17,56	14,22			
Серебро	-	13,95	-			
Стронций	223,3	131,9	781,6			
Сурьма	0,47	-	-			
Титан	736,3	392,4	2983			
Фосфор	343,7	100,9	680,7			
Хром	16,13	11,58	44,17			
Цинк	111,7	57,1	77,11			
Цирконий	24,56	12,34	100,7			

Исследование оседания частиц пыли в воздушном потоке имеет большое значение для выявления дальности распространения пылевого облака от источников пылеобразования. Скорость оседания частиц размером от 1 до 100 мкм согласуется с формулой Стокса [161].

$$V_{\text{max}}=2,03\rho d^{4/5}$$
 $V_{\text{min}}=0,474\rho d^{4/5}$

Многочисленными исследованиями витающей в воздухе соляной пыли установлено, что ее вещественный состав изменяется с удалением от источника пылеобразования. В Ленинградском горном институте (Санкт-Петербургский горный университет) были проведены (табл. 1.5) анализы пыли, осевшей на поверхности бумаги за сутки на различных расстояниях от забоя. Установлено, что с удалением от источника пылеобразования в пыли уменьшается содержание растворимых солей, в первую очередь MgCl₂ и KCl, в 2–3 раза увеличивается влажность пыли и содержание нерастворимого остатка. Такая картина объясняется тем, что соляные частицы под влиянием относительной влажности воздуха в силу своей гигроскопичности увлажняются, коагулируют и частично оседают, а мельчайшие частицы нерастворимого остатка длительное время находятся во взвешенном состоянии и переносятся воздушным потоком на большее расстояние от источника пылеобразования [103].

Таблица 1.5 — Изменение вещественного состава витающей пыли в зависимости от удаленности от источника пылеобразования

2	%	、 0	<u>\</u> 0	0	Состав н.о., %					
Расстояние от источника пылеобразования, 1	Содержание растворимых солей,	Содержание н.о., %	Влажность пыли, %	Содержание SiO ₂ в всей пробе, %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Вещества органического происхождения, %
10	96,37	3,41	0,28	0,39	11,40	7,35	5,28	13,78	8,80	53,39
25	96,57	3,35	0,36	0,39	11,60	6,88	5,08	14,05	8,80	53,39
50	96,41	3,55	0,56	0,50	14,10	6,26	6,50	14,90	8,46	49,78
75	96,12	3,63	0,76	0,55	15,15	6,90	4,96	13,50	8,55	50,94
100	95,17	3,63	0,76	0,53	15,00	6,80	5,30	14,15	7,95	50,80
150	95,38	3,74	0,56	0,75	20,00	7,50	6,35	12,50	7,76	45,89
200	94,81	3,49	0,28	0,56	16,05	7,75	7,75	12,30	10,00	46,15
250	96,51	3,72	0,70	0,64	17,20	6,45	6,45	13,20	8,35	48,35
300	95,04	4,78	0,46	0,86	18,00	6,70	8,40	12,50	6,50	47,85
350	94,60	3,70	0,51	0,90	24,30	0,20	9,20	14,85	11,60	30,85

Кроме того, исследования, проведенные в Ленинградском горном институте, [140] показали, что в пыли Солигорских рудников при низком начальном содержании SiO₂ (0,3–0,4 %) на расстоянии 300–400 м от источника пылеобразования содержание двуокиси кремния достигает 1–1,5 %. Наглядным примером существования этой связи является рисунок 1.2, на котором показано, что с удалением от источника пыли содержание SiO₂ возрастает.



Рисунок 1.2 – Изменение содержания SiO₂ в нерастворимом остатке витающей пыли с удалением от источника пыли

В целом анализ состава пыли калийных рудников показывает, что они являются многокомпонентными системами и их минеральный состав зависит от изменения состава вмещающих пород и полезного ископаемого. При этом минеральный состав витающей в воздухе пыли может отличаться от состава исходного соляного массива. Кроме того, при движении пылевого потока по горным выработкам происходит дальнейшее изменение состава пыли, при котором удельный вес растворимых компонентов уменьшается в зависимости от относительной влажности воздуха, а относительное содержание нерастворимого остатка увеличивается.

Дисперсный состав. Поскольку основным способом попадания пыли в организм человека является ингаляционный, дисперсный состав пыли играет существенное значение для гигиенической оценки ее воздействия на человека. Кроме того, дисперсный состав пыли важен для понимания ее взаимодействия с влажным воздухом и используется при разработке математических моделей динамики пылевого аэрозоля по горным выработкам.

Изучению дисперсного состава калийной пыли Верхнекамского, Старобинского и Прикарпатского месторождений посвящены работы [100, 107, 168]. Изучение проводилось путем микроскопического анализа, проб, отобранных кониметром Цейса, седиментационным способом с последующей консервацией путем осаждения пыли спирте. В таблицах 1.6–1.7 представлены результаты исследований дисперсного состава калийной пыли, проведенные М.М. Сметаниным [138].

Место отбора проб	Фракционный состав, %									<u>Частиц</u> см ³	Средний диаметр частиц, мкм
	до 1	1–2	2–3	3–5	5–10	10–20	20–40	40–70			
Рабочее место машиниста комбайна ПК-8 (комбинат «Беларуськалий»)	МКМ	46,4	<u>мкм</u> 24,6	19,9	6,4	1,19	0,83	0,27	1000	9900	4,0
Рабочее место помощника машиниста комбайна ПК-8 (комбинат «Беларуськалий»)		43,3	26,1	21,28	4,77	2,45	1,31	0,79	1000	11300	4,5
Рабочее место скрепериста (Отбойка руды		60,2	28,1	8,2	2,9	0,6			1000	7240	3,8

Таблица 1.6 — Дисперсный состав калийной пыли

Место отбора проб	Фракционный состав, %									<u>Частиц</u> см ³	Средний диаметр частиц, мкм
1	до 1 мкм	1-2 мкм	2—3 мкм	3–5 мкм	5–10 мкм	10–20 мкм	20–40 мкм	40–70 мкм			
комбайном ШБМ. Комбинат «Беларуськалий»)											
Рабочее место скрепериста (отбойка руды БВР, шахта им.50- летия Октября, КХМК)	37,5	35,0	11,5	10,0	4,2	0,5	0,3		1000	6245	2,4
Рабочее место помощника скрепериста (Шахта им.50- летия Октября. КХМК)	30,1	29,0	22,4	9,2	6,3	2,1	0,9		1000	8520	3,3
Подземная камера дробления, рабочее место машиниста дробилки (Ново- Стебниковский рудник)	41,6	44,4	8,4	3,2	2,1	0,3			1000	19740	1,8
Цех грануляции обогатительной фабрики		54,17	29,5	9,5	3,87	1,88	1,0	0,18	1000	10370	3,8

Таблица 1.7 — Дисперсный состав пыли

Место отбора проб			Фраки	ционный	Кол-во прокачен ного воздуха, см ³	<u>Частиц</u> см ³	Средний диаметр частиц, мкм			
	до 1 мкм	1—2 мкм	2—3 мкм	3—5 мкм	5—10 мкм	10–15 мкм	15–20 мкм			
Подземная камера дробления, на верхней площадке (шахта № 3)	55,0	21,0	11,3	5,5	4,0	2,5	0,7	1000	32000	2,4
Подземная камера	67,8	16,8	8,8	4,1	1,4	0,75	0,35	1000	21950	1,6

Место отбора проб			Фраки	ционный	Кол-во прокачен ного воздуха, см ³	<u>Частиц</u> см ³	Средний диаметр частиц, мкм			
	до 1 мкм	1-2 мкм	2—3 мкм	3—5 мкм	5—10 мкм	10–15 мкм	15–20 мкм			
дробления, (Рабочее место машиниста дробилки. Шахта № 3)										
Рабочее место помощника машиниста экскаватора (шахта им. Свердлова)	56,4	17,3	9,7	7,5	4,8	2,8	1,5	1000	8760	2,7
Рабочее место скрепериста (шахта № 3)	43,0	22,3	15,3	9,0	5,8	2,9	1,7	1000	9345	3,1
10 м от опрокида по ходу вент. струи (шахта № 3)	60,2	20,8	9,5	5,1	2,8	1,9	0,7	1000	10140	2,1
20 м от опрокида по ходу вент. струи (шахта № 3)	68,6	21,8	5,95	2,87	0,8			1000	7235	1,28
Рабочее место бурильщика (Бурение электросверлом СЭР-19 д. Шахта № 3)	15,0	23,9	20,2	18,1	15,5	10,8	6,5	1000	5425	6,9

Из таблиц видно, что в пробах преобладают частицы размерами до 5 мкм.

Форма частиц. Форма частиц калийной и каменносоляной пыли оказывает влияние на агрегацию частиц, на взаимодействие их с влагой воздуха, растворимость и т.д. Исследования фракционного состава калиной пыли, образующейся при добычных работах, проводились в лаборатории геологии месторождений полезных ископаемых Горного института УрО РАН с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMH (Tescan) с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа OxfordInstruments INCA Energy 250/X-max 20.

На рисунке 1.3 представлены результаты оценки формы частиц исследуемой пыли.



Общий вид пробы и размеры наиболее крупных частиц



Морфология и размеры частиц (увеличение 269 x).



Морфология и размеры частиц (увеличение 630 х).



Морфология и размеры частиц (увеличение 965 x).

Рисунок 1.3 – Морфология и размеры частиц соляной пыли, выделяющейся в процессе добычи полезного ископаемого

Установлено, что исследуемые пробы содержат остроугольные частицы галита (84,3%), сильвина (14%), кальцита (1,7%) и единичные знаки алюмосиликатного (глинистого) материала и кварца. Размер варьирует от нескольких микрон до 200, преобладающий – 20–40 микрон [42].

Частицы калийной пыли образуют кубическую, ромбическую, столбчатую, параллелепипедную форму и форму правильных многогранников.

1.3 Влияние запыленности рудничной атмосферы калийных рудников на здоровье горнорабочих

Подробное всестороннее изучение воздействия калийной пыли на организм человека проводилось многими учеными на основе статистических (И.И. Медведев, И.И. Бухаров, А.Е. Красноштейн и др.), клинических (Н.И. Николаева, Э.В. Каравайная, Е.С. Толстых, Р.Ф. Лесневский, и др.) и медико-биологических данных (Н.В. Бессмертнова, С.Н. Доценко, Н.Н. Покровский и др.).

Согласно постановлению Главного государственного санитарного врача РФ от 13 февраля 2018 г. № 25 "Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.2.5.3532–18 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны" сильвинитовая пыль отнесена к третьему классу опасности. Предельно допустимая концентрация сильвинитовой пыли в рабочей зоне составляет 5 мг/м³ [121].

Основным способом поступления пыли в организм человека является ингаляционный. При этом эффект воздействия пыли на организм будет зависеть как от химического состава пыли, так и от глубины проникновения в дыхательные пути. Подводящие дыхательные пути предшествуют альвеолам, в них может происходить некоторая экстракция газов с высокой растворимостью или с высоким химическим сродством к тканям и жидкостям, выстилающим органы дыхания [191, 212].

Основными средствами индивидуальной защиты (СИЗ), применяемыми на горнодобывающих предприятиях калийной промышленности, остаются респираторы различных марок, основными из которых можно назвать респираторы «клапанные «Астра-2», Ф-62Ш и бесклапанные ШБ-1 «Лепесток» (ШБ-1-200, ШБ-1-100, ШБ-1-50) [149]. В технических характеристиках этих респираторов указывается возможность ведения работ при 50–80 кратном превышении предельно допустимой концентрации. В случае с сильвинитовой пылью этот порог составляет 50–400 мг/м³ воздуха. При этом концентрации пыли в рабочих зонах могут достигать значений 2500 мг/м³ и выше. Это говорит о том, что несмотря на формальное применение СИЗ, соляная пыль попадает в органызм горнорабочих. Установлено, что масса пыли сильвинита, поступающей в органы дыхания для разных профессиональных групп, составляет от 50 г до 160 г в год [64].

По данным Косяченко Г.Е. образующаяся при работе машин пыль характеризуется высокой степенью дисперсности. В среднем от 60,5 до 83,7 % витающей в зоне дыхания пыли имеет размер до 5 мкм, и изменения фракционного состава несущественны при всех типах горнодобывающей техники [64,43].

Анализ литературы показывает, что при принятой технологии машинной выемки калийных руд и использовании современного горного оборудования на рабочих воздействует комплекс неблагоприятных производственно-профессиональных факторов, среди которых на первые места по выраженности и распространенности следует отнести аэрозоль сильвинита и интенсивный шум. В камерах при работе некоторых типов комбайнов к указанным вредностям присоединяются неудовлетворительные микроклиматические условия.

Проведенный анализ основных общих показателей заболеваемости с временной утратой трудоспособности работающих в ПО «Беларуськалий» за 30 летний период свидетельствует, что уровень их колебался от наиболее высоких в периоды 1971-1975 и 1976-1980 годах (по объединению в целом – 77,3 – 80,8 случаев и 951,5 – 960,9 дней нетрудоспособности на 100 работающих) до наиболее низких в период 1986-1990 гг. (67,8 случаев и 703,4 дней нетрудоспособности). Заболеваемость шахтеров, как по случаям, так и по дням временной нетрудоспособности в 1,1–1,4 раза превышала уровень заболеваемости работающих обогатительных фабриках.

В целом, по материалам общих показателей, используя шкалу Е.Л. Ноткина (1979), уровень заболеваемости работников объединения в последнее десятилетие можно определить как средний (даже среди шахтеров).

Сравнительный анализ материалов амбулаторного наблюдения и результатов медицинских осмотров горнорабочих свидетельствует, что 56,9+3,10 % машинистов комбайнов страдают болезнями различных органов и систем, в то время как среди рабочих ремонтной службы – 27,6+2,29 %, т. е. в 2,1 раза меньше. Разница в количестве всевозможных заболеваний среди указанных профессиональных групп с учетом, стандартизованных по возрасту и профессиональному стажу показателей существенна и равна 26,2–29,3 %.

У машинистов комбайнов чаще регистрируются болезни органов дыхания, удельный вес которых равен 32,9+2,94 %. Среди болезней данной группы 50 % занимает патология верхних дыхательных путей и 47,6 % - хронический бронхит, которые встречаются соответственно у 15,7+2,28 % и 16,5+2,32 % обследованных. У лиц ремонтной службы болезни органов дыхания диагностируются у 9,2+1,48 % лиц.

Болезни нервов и периферических ганглиев встречаются у 24,3+2,69 % машинистов комбайнов и у 11,6+1,64 % горнорабочих ремонтной службы, т. е. среди рабочих последней группы на 12,7 % реже. Болезни органов пищеварения обнаруживаются у 22,0+2,7 %

машинистов комбайнов. Часто выявляются эти болезни и среди горнорабочих ремонтной службы (в 12,9+1,72 %), однако, у последних на 9,1 % реже (Тр=2,81).

Болезни системы кровообращения у машинистов комбайнов обнаруживаются у 11,0+1,96% случаев, у горнорабочих ремонтной службы – в 2,2 раза реже, у 5,0+1,12 % лиц. Среди болезней кровообращения наибольший удельный вес занимают гипертоническая болезнь (26,3–39,3%) и предгипертоническое состояние (35,7–36,8%).

Болезни уха и сосцевидного отростка установлены у 5,9+1,47 % машинистов комбайнов. У горнорабочих же ремонтной службы указанные болезни встречаются в 11,8 раза реже - у 0,5+0,36 % осмотренных лиц (Тр=3,57).

Болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани выявляются среди 7,4+1,64 % машинистов комбайнов. Отмеченными болезнями горнорабочие ремонтной службы страдают в 6,7 раза реже (Тр=3,65), они составляют только 1,1+0,53 % случаев на 100 работающих.

При этом распространенность хронических болезней среди горнорабочих напрямую зависит от продолжительности работы по профессии. В группе машинистов комбайнов количество болеющих в 1,8–2,4 раза больше, и при стаже 4-6 лет составляет 51,1+7,45 %, 7-9 лет - 66,0+6,70 % и старше 10 лет - 68,5+4,47 %. Среди горнорабочих ремонтной службы, имеющих стаж работы 4–6 лет, заболевания выявляются у 15,7+4,35 %.

Характерно, что частота регистрации болезней органов дыхания среди машинистов комбайнов происходит значительно интенсивнее, чем среди горнорабочих ремонтной службы. Так, при стаже работы до 3 лет указанные болезни обнаружены у 3,8+2,65 % машинистов комбайнов и у 1,3+1,30 % горнорабочих ремонтной службы. В дальнейшем, с увеличением стажа работы, заболеваемость машинистов комбайнов повышается в 10,0–12,1 раза и достигает к 4–6 годам работы по профессии 37,8+7,22 %; 7–9 годам - 46,0+7,05 %. Среди горнорабочих ремонтной службы число больных нарастает медленнее.

Анализ материалов официальной отчетности за 11-летний период свидетельствует об относительно низкой выявляемости профессиональных заболеваний среди работающих объединения «Беларуськалий». Ежегодно диагноз профессионального заболевания устанавливается у 2–8 человек. За 11 лет такой диагноз по объединению в целом поставлен у 59 человек, в том числе среди рудничных рабочих у 52 человек. Основной профессиональной патологией у шахтеров (рис. 1.7) являются нейросенсорная тугоухость, пылевой бронхит и вибрационная болезнь.



Рисунок 1.4 – Структура профессиональной заболеваемости за 1990–2000 гг. (в %) среди горнорабочих ПО «Беларуськалий»

Это свидетельствует, что ведущие производственные вредности в калийных рудниках — высокие уровни запыленности воздуха рабочей зоны, интенсивный широкополосный шум и вибрация при работе горного оборудования определяют уровень и нозологическую структуру профессиональной заболеваемости [64].

Аналогичные исследования проводились на горнодобывающих предприятиях Верхнекамского и Прикарпатского месторождений калийных солей. На рисунке 1.5 представлена диаграмма сравнения заболеваемости работающих на калийных рудниках [92, 103].

Наиболее высокие показатели заболеваемости получены по болезням, связанным с запылённостью рудничного воздуха. На руднике Соликамского калийного рудоуправления № 1 у машинистов комбайнов, бурильщиков, скреперистов и других сотрудников, работа которых связана с постоянным пребыванием в запыленной атмосфере, показатель заболеваемости этими болезнями в среднем в 1,95 раза выше, чем у трудящихся II группы, пребывание которых в запыленной атмосфере носит эпизодический характер. Для Березниковских рудников это соотношение равно 2,15, для Солигорских (Старобинское месторождение) 1,78 [92].

Анализ заболеваемости по годам для одних и тех же категорий работников показал, что трудопотери из-за общей заболеваемости закономерно возрастают с повышением запыленности на рабочих местах. Увеличение средней запыленности воздуха у рабочих первой группы с 34 -55 до 65–108 мг/м³ привело к росту средней продолжительности трудопотерь в 1,4–1,51 раза.



Рисунок 1.5 – Динамика заболеваемости работающих на калийных рудниках: 1 – по Первому Соликамскому; 2 – по Первому Березниковскому; 3 – по Первому Солигорскому

Существенное влияние на продолжительность трудопотерь оказывает стаж работы в запыленной атмосфере. В таблице 1.8 представлены данные, свидетельствующие об этой зависимости [103].

Стаж работы, лет	Число случаев заболеваний	Продолжительность
	на 100 работающих	трудопотерь в году на 100
		работающих
До 2 лет	100	100
2–4 года	144	202
Свыше 4 лет	195,7	219,6

Таблица 1.8 — Влияние стажа работы в запыленной атмосфере на трудопотери

Клинические данные по заболеваемости рабочих, опубликованные в открытой печати, свидетельствуют об изменениях в организме горнорабочих калийных рудников, длительное время находящихся в атмосфере с повышенной запыленностью.

Так медицинское обследование 413 работников Калушского химического комбината [103] показало, что наиболее высокий уровень респираторных заболеваний наблюдается у людей, работающих в условиях высокой запыленности (дробильный цех – 52 %, горный цех 42 %, химическая фабрика – 22 %).

Аналогичные данные получены в результате медицинских осмотров работников других комбинатов [112,111,136,151]. Детальный обзор клинических данных и результатов комплексных биохимических анализов [163] показал, что при вдыхании соляной пыли лишь незначительная ее часть в виде нерастворимого осадка остается в верхних дыхательных путях. Большая часть пыли растворяется на слизистых оболочках носоглотки и бронхов, а затем всасывается в кровь или выводится вместе со слизью.

Таким образом, исследования показали, что пыль калийных рудников, хотя и не обладает ярко выраженными токсическими свойствами, является биологически активной. Длительное вдыхание ее в больших концентрациях вызывает функциональные сдвиги в печени, системе гипофиз – кора надпочечников, иммунобиологической активности организма, изменения в легких, слизистой оболочке носа.

Вместе с тем многолетнее пребывание людей в атмосфере со сравнительно невысокой запыленностью (50–60 мг/м³) не оказывает заметного специфического воздействия на организм.

Более того, известно, что вдыхание небольших концентраций калийносолевых аэрозолей оказывает благоприятное и даже лечебное воздействие на организм [94].

1.4 Факторы производственной среды, усугубляющие негативное воздействие соляной пыли на организм горнорабочих

Известно, что взаимодействие пыли с горючими или токсичными газами создают воздушную среду, гораздо более негативно воздействующую на организм горнорабочих. Поэтому выделение природных газов из горного массива усугубляет негативное влияние соляной пыли. К таким газам относятся серосодержащие газы: «глазоедка», сероводород и меркаптаны.

Природные серосодержащие газы являются основной ядовитой примесью, выделяющейся в рудничную атмосферу из массива [39, 40, 38]. Природу образования сероводорода в массиве горных пород описывал В. И. Вернадский. Он относил сероводород к газам, образование которых возможно лишь при температурном воздействии на горные породы. По генезису им были выделены ювенальный и вадозный сероводород. Последующие, более детализированные классификации, разработали В.В. Белоусов, А.Л. Козлова, В.А. Соколова, В.И. Кравцова и др. Этими авторами были предложены

гипотезы об абиогенном образовании сероводорода при химической редукции сульфатов, термодеструкции сероорганических соединений битумов и нефти, взаимодействии элементарной серы с углеводородами и др. [3]. Многие авторы считают, что сероводород в осадочных породах накапливается, главным образом, при биохимических процессах, в результате взаимодействия органического вещества с сульфатами и различными солями под влиянием сульфатредуцирующих бактерий [6]. Вопросам образования и распространения сероводорода в породах калийных месторождений и борьбы с ним посвящена монография видного ученого А.Н. Земскова с соавторами [39].

Одно из первых упоминаний о выделении сероводорода в калийных рудниках относится к 1912 г., когда на руднике «Края-Золлштедт» (Южный Гарц) наблюдались газовыделения из пород лежачего бока, характеризующиеся сильным запахом сероводорода [199]. Еще позднее на руднике «Нейеблейхерода» несколько месяцев подряд из карналлитовой синеклизы выделялся газ с очень высокой концентрацией сероводорода [203]. Выделение сероводорода вызывало сильную коррозию насосов и труб. В небольших количествах (до 0,05 %) сероводород встречается в составе газов соленосных пород на рудниках Польши [197].

Медленные выделения газа, часто сопровождаемые вытеканием рассолов, приурочены к слоям ангидрита и калийных пород. Объемная доля сероводорода в составе микровключенного газа из каменной соли, покрывающей слои сильвинита III горизонта Первого Солигорского рудника ОАО «Беларуськалий», достигла 7,6 % [2], хотя в составе свободного газа он ни разу не был зафиксирован. Наличие серосодержащих газов многократно отмечалось и на горизонте Первого Солигорского рудника ПАО «Беларуськалий» [37].

На рудниках Верхнекамского калийного месторождения содержание сероводорода в рудничной атмосфере Второго Соликамского рудника (СКРУ-2) достигало 0,01—0,02 об. % (при ПДК = 0,00071 об. %). Серьезную проблему сероводород создает на руднике Третьего Соликамского рудоуправления (СКРУ-3).

Сероводород представляет собой простейшее соединение серы и водорода. Это бесцветный газ, обладающий специфическим запахом тухлых яиц, причем запах концентрированного сероводорода не ощущается вследствие поражения обонятельного нерва с последующей потерей обоняния. Очень ядовит. Интоксикация может произойти внезапно. По шкале опасности он отнесён к 3 классу. Сероводород хорошо растворим в воде. Относится к легковоспламеняющимся веществам, при концентрации в воздухе от 4 до 45% образует с кислородом взрывоопасную смесь. При контакте с металлами (особенно,

если в газе содержится влага) вызывает сильную коррозию.

Поскольку сероводород ядовит, то выделяясь из пород в значительных количествах, он вызывает серьезные отравления. Острые отравления сероводородом могут различаться по степени тяжести. При легкой интоксикации основные симптомы обусловлены раздражающим действием — это обильное отделяемое из носа, слезотечение, гиперемия конъюнктивы, ощущение песка в глазах, жжение и першение в носоглотке, осиплость голоса. При отравлении средней степени тяжести к местным симптомам присоединяются признаки системного действия токсина: головная боль, головокружение, тошнота, рвота, диарея, резкая слабость. Тяжелое отравление характеризуется нарушением деятельности сердечно-сосудистой (тахикардия, аритмия, резкая гипотония, нитевидный пульс) и дыхательной (поверхностное непродуктивное дыхание, одышка) систем. Нейротоксическое действие проявляется угнетением сознания или психомоторным возбуждением, состоянием эйфории, зачастую пострадавший оглушен или недоступен контакту, возможно развитие комы. Смертельная концентрация этого газа в воздухе очень мала - всего 0,1 %. Такое количество сероводорода может привести человека к летальному исходу за 10 минут. Стоит лишь немного увеличить концентрацию - и смерть наступает мгновенно, после первого же вдоха.

Обладая высокой летучестью, сероводород поступает в организм преимущественно через дыхательные пути, но может всасываться и через неповрежденные кожные покровы. Являясь высокотоксичным веществом, сероводород оказывает сильное раздражающее действие на слизистые оболочки глаз и дыхательных путей. Тяжесть интоксикации обусловлена концентрацией газа в воздухе и временем воздействия, например, смертельная концентрация, составляет 830 мг/м³ в течение 30 минут или 1100 мг/м³ в течение 5 минут [134,104,74].

Единственным средством борьбы с сероводородом в рудничной атмосфере действующих рудников является вентиляция, однако количество выделяющегося газа может быть настолько большим, что для действенного проветривания выработки потребуется количество воздуха, с которым не справится вентилятор местного проветривания.

Более того, беспредельное увеличение подачи свежего воздуха как в отдельную выработку, так и в рудник в целом на сегодня технически невозможно в рамках существующей организации рудничного проветривания. Поэтому необходимо решить задачу повышения его эффективности при условии научной обоснованности применяемых технологий проветривания.

1.5 Экспериментальные исследования пылевой обстановки в калийных рудниках

Рассмотрим основные группы источников пылевыделения в современном калийном руднике:

 проходческие и очистные забои – тупиковые комбайновые проходческоочистные выработки либо рабочая зона комбайнового комплекса в лавах;

 распространение пыли в сети горных выработок - пересып руды с конвейера на конвейер;

работа скипового подъема.

Роль вышеприведенных источников пыления различна, при этом на наличие пыли в вентиляционной сети горных выработок (вне рабочих зон) большое влияние оказывают влияние процессы транспортировки полезного ископаемого, который на калийных рудниках осуществляется конвейерами. При этом наиболее пыльными являются места перегруза руды с конвейера на конвейер.

Нами были отобраны пробы воздуха в местах перегруза руды (замеры произведены на руднике Гремячинского месторождения калийных солей):

- непосредственно у места перегруза (в 1 м);
- в 10 м от места перегруза по направлению воздушной струи;
- в 10 м от места перегруза против направления воздушной струи.

Анализируя данные, представленные в таблице, видим, что замерные точки, расположенные в радиусе 1 м от узла перегруза горной массы, характеризуются наибольшими значениями массовых концентраций пыли. В замерных точках, находящихся на расстоянии 10 м от места перегруза горной массы, концентрация зависит от ряда факторов: количества воздуха, проходящего по выработке, влияния дополнительных источников пылеобразования. В целом по руднику концентрация пыли в непосредственной близости от места перегруза горной массы колеблется в широких пределах от 48 мг/м³ до 4215 мг/м³ (10–843 ПДК).

На рисунке 1.6 представлена схема замеров у двух узлов перегруза горной массы (замеры проведены на всех узлах перегруза).



Рисунок 1.6 – Схема расположения замерных точек определения массовой концентрации пыли, выделяющейся в процессе перегрузки руды.

В таблице 1.9 представлены данные массовой концентрации пыли и условия замеров. Таблица 1.9 — Результаты замеров массовой концентрации пыли

	Параметры рудничного воздуха в месте отбора проб								
Место отбора пробы	Количество воздуха, м ³ /с	Температура, ∘С	Относительная влажность, %	Концентрация пыли, мг/м ³					
Пе	регруз горной	груз горной массы (ПТШ № 1.1)							
На расстоянии 10 м по	21	35,5	31	265,1					
направлению струи воздуха.									
На расстоянии 10 м по	5	32,5	31	766					
направлению струи воздуха.									
В радиусе 1 м от места	26	31	31	4095,1					
падения горной массы.									
На расстоянии 10 м против	26	31	31	369					
направления струи воздуха.									
Пе	регруз горной массы (ПТШ № 1.2)								
На расстоянии 10 м против	30	27,9	27,9	898,4					
направления струи воздуха.									
В радиусе 1 м от места	30	27,9	27,9	4032					
падения горной массы.									
На расстоянии 10 м по	30	27,9	27,9	462,3					
направлению струи воздуха.									

Обратимся к анализу запыленности в рабочих зонах. В рабочей зоне тупиковой комбайновой выработки, проходимой по сильвинитовому пласту, замеры концентрации
пыли были проведены в трех режимах работы комбайнового комплекса (при минимальной, средней и максимальной подаче комбайна на забой) в нескольких замерных точках.

Этими точками были (см. рис. 1.7.):

- рабочее место машиниста комбайна (добычной комплекс работает без бункера перегружателя) – точка 1;
- рабочее место машиниста самоходного вагона (в момент загрузки руды в вагон) точка 2;
- в 30 м от кабины машиниста комбайна точка 3;
- в устье рабочей камеры (приблизительно в 100–150 м от забоя выработки) точка 4.



Рисунок 1.7 – Схема проведения замеров

Способ проветривания выработки - нагнетательный, отставание вентиляционного става от кабины машиниста комбайна 10 м. Проветривание осуществляется вентилятором местного проветривания ВМЭ – 12А, фактическое количество воздуха, поступающего в рабочую зону, составляет 5,5 м³/с.

В таблице 1.10 приведены результаты замеров концентрации пыли в рабочей зоне. Таблица 1.10 — Результаты замеров концентрации пыли в рабочей зоне

	Параметры рудничного воздуха в месте отбора проб					
Место отбора пробы	Скорость,	Температура,	Относительная	Концентрация		
	м ³ /с	°C	влажность, %	пыли, мг/м ³		
При минимал	ьной скорост	ти подачи комба	йна на забой			
Рабочее место машиниста	8,6	35,3	22,1	334,1		
комбайна, точка 1						
Рабочее место машиниста	8,6	35,4	22,1	792,3		
самоходного вагона, точка 2						
На расстоянии 30 метров от	8,6	35,5	21,8	856,2		
комбайна, точка 3						
В устье выработки, проводимой	8,6	32,2	21,5	18,9		
комбайном, точка 4						
При средне	ей скорости і	юдачи комбайна	а на забой			
Рабочее место машиниста	8,6	35,5	22,1	1306,4		
комбайна, точка 1						
Рабочее место машиниста	8,6	35,5	22,1	1463,4		
самоходного вагона, точка 2						

	Параметры рудничного воздуха в месте отбора проб						
Место отбора пробы	Скорость,	Температура,	Относительная	Концентрация			
	м ³ /с	°C	влажность, %	пыли, мг/м ³			
На расстоянии 30 метров от	8,6	35,5	21,8	2422,4			
комбайна, точка 3							
В устье выработки, проводимой	8,6	33,2	21,4	267,6			
комбайном, точка 4							
При максимал	ьной скорос	ги подачи комба	йна на забой				
Рабочее место машиниста	8,6	35,5	22,1	1773,7			
комбайна, точка 1							
Рабочее место машиниста	8,6	35,5	22,1	1706,6			
самоходного вагона, точка 2							
На расстоянии 30 метров от	8,6	35,5	21,8	798,6			
комбайна, точка 3							
В устье выработки, проводимой	8,6	33,2	21,4	193,1			
комбайном, точка 4							

На рисунке 1.8 представлена диаграмма сравнения значений концентрации пыли в различных точках рабочей зоны тупикового комбайнового забоя при минимальной, средней и максимальной скорости подачи комбайна на забой подачи комбайна на забой.

Рассматривая три замерные точки, относящиеся непосредственно к рабочей зоне, можно отметить, что максимальная концентрация пыли при минимальной скорости подачи комбайна на забой зафиксирована в точке № 3 (30 м от кабины машиниста комбайна) и составляет 856,2 мг/м³ (171 ПДК).



Рисунок 1.8 – Концентрация пыли в различных точках рабочей зоны тупикового комбайнового забоя при минимальной, средней и максимальной скорости подачи комбайна на забой

На рабочем месте машиниста комбайна (при данном режиме) зафиксирована минимальная концентрация (из трех точек) 334,1 мг/м³. Это объясняется тем, что через точку № 3 проходит весь отработанный воздух, несущий соляную пыль, при этом очевидно, что на расстоянии 30 м пыль не успевает осесть.

В точке № 4, куда приходит тот же объем отработанного воздуха, концентрация пыли существенно ниже - от 18,9 до 267,6 мг/м. Это обусловлено тем, что при движении пыли по длине камеры (порядка 100–150 м) она успевает осесть на почву и стенки горной выработки.

Во всех трех точках прослеживается зависимость концентрации пыли от скорости подачи комбайна на забой. Исключение составляет точка № 3 (30 м от кабины машиниста комбайна), где неожиданно концентрация пыли при максимальной скорости подачи снижается по сравнению со средней и минимальной скоростью. Данный результат, вероятнее всего, связан с «погрешностью измерения».

В целом можно отметить, что концентрация пыли при минимальной и максимальной скоростях подачи комбайна на забой отличается в 5 раз, 334,1 мг/м³ и 1773,7 мг/м³ соответственно (67–355 ПДК).

Кроме того, необходимо отметить, что в точках № 1 и № 2, находящихся в зоне действия свежей струи воздуха, выходящей из вентиляционного става, концентрация пыли выше, чем в точке № 3, расположенной в 30 м от комбайна при том, что через точку № 3 проходит весь запыленный воздух.

Натурные наблюдения показывают, что при нагнетательном способе проветривания струя воздуха, выходящая из вентиляционного става, не только турбулизирует воздушные массы в призабойной части выработки, но и создает вихрь масштабом в забой и частично возвращается обратно.

Величина вихря будет зависеть от количества подаваемого воздуха и отставания конца вентиляционного става от груди забоя (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Воздушный вихрь, образующийся при нагнетательном способе проветривания тупиковой выработки

Этот процесс и является причиной того, что точки № 1 и № 2 (рабочие места машиниста комбайна и машиниста самоходного вагона) сильно запылены.

Работу скипового подъема условно можно разделить на три процесса: загрузка скипов, движение скипа по стволу и разгрузка скипа в приемный бункер. Рассмотрим эти процессы на примере рудника 4 РУ ПАО «Беларуськалий».

Загрузка руды в скипы. Ниже вентиляционного горизонта расположены дозаторные камеры, из которых производится загрузка руды в скипы. Южная дозаторная (подъемная машина ЦШ) расположена на отметке – 693,6 м, северная (подъемная машина МК) – на отметке – 676,6 м. Емкость дозаторной камеры соответствует емкости скипа.

Замеры концентрации пыли при загрузке и разгрузке скипов проводились на двух стволах № 3 и № 4 рудника 4 РУ.

В таблице 1.11 представлены результаты замеров на нижних площадках стволов № 3 и № 4, выполненные в момент загрузки скипов.

	Наименование места отбора	Температура, ⁰ С	Влажность, %	ПДК, мг/м ³	Резул измеј запыле мг Среднее	ьтаты рения нности, /м ³ Среднее
		Южная дозато	рная камера		зпачение	значение
Загрузка скипа	Южная камера ствола № 3	22,8	37	5	5440	11052.5
Загрузка скипа	Южная камера ствола № 4	24,6	41	5	16667	11053,5
		Северная дозат	орная камера			
Загрузка скипа	Северная камера ствола № 3	21,8	37	5	14282	12720
Загрузка скипа	Северная камера ствола № 4	24,8	47	5	11196	12/39

Таблица 1.11— Результаты замеров на нижних площадках стволов № 3 и № 4

Из таблицы видно, что концентрации пыли на нижних площадках в момент загрузки скипов северной и южной дозаторных камер находятся примерно на одном уровне (11053,5 и 12739 мг/м³). Поскольку скорость воздуха на данном участке ствола не превышает 0,5 м/с, то можно предположить, что большая часть этой пыли не попадает в верхнюю часть ствола, а оседает в зумпфе. Данное предположение подтверждается результатами замеров концентрации пыли в тех же местах, но на верхних площадках. Результаты замеров приведены в таблице 1.12.

					Резул измеј	ьтаты рения
	Наименование	Температура,	Влажность,	ПДК,	запыле	нности,
	места отоора	Ľ	%	МΓ/ М°	МГ	/M ³
					Среднее	Среднее
					значение	значение
		Южная дозато	рная камера			
Загрузка скипа	Южная камера ствола № 3	22,8	37	5	6442,5	4075 1
Загрузка скипа	Южная камера ствола № 4	24,6	41	5	2107,7	4275,1
		Северная дозат	орная камера			
Загрузка скипа	Северная камера ствола № 3	21,8	37	5	2237	2281.7
Загрузка скипа	Северная камера ствола № 4	24,8	47	5	2326,5	2201,7

Таблица 1.12 — Результаты замеров на верхних площадках стволов № 3 и № 4

Из таблицы видно, что концентрация пыли на верхних площадках значительно ниже, чем на нижних (в южной камере в 2,5 раза, в северной в 5,5 раза). Это говорит о том, что большая часть пыли, выделившейся на нижних площадках, не поднялась вверх.

Совсем незначительные концентрации пылевого аэрозоля зафиксированы в исходящих воздушных потоках. Концентрация пыли в них лишь ненамного превышает ПДК (таблица 1.13).

	-			·		
Наименование места	Температура,	Влажность,	ПДК,	Результаты измерения запыленности, мг/м ³		
отбора	отбора ⁰ С %		мг/м ³	Среднее	Среднее	
Восточное крыло, ствол № 3	19,6	47	5	5,6		
Восточное крыло, ствол №4	24,2	46	5	8,0	0,8	
Западное крыло, ствол № 3	19,3	47	5	7,6	65	
Западное крыло, ствол № 4	21,1	45	5	5,4	0,5	
Выработка чистки зумпфа, ствол № 3	20,2	37	5	4,1		
Выработка чистки зумпфа, ствол № 4	22,5	36	5	5	4,6	

Таблица 1.13 — Концентрации пылевого аэрозоля з в исходящих воздушных потоках

Однако при небольших концентрациях пыли (6–7 мг/м³) мы имеем дело с большими объемами воздуха (10000–12000 м³/мин). В то же время с уверенностью можно утверждать, что вся пыль из исходящих потоков поднимается по стволу, а, значит, вносит свой вклад в образование соляных наростов на расстрелах ствола. Масса пыли, поднимающейся по стволу в течение года (поступающая только с исходящей струей), составляет порядка 35–45 тонн/год.

В таблице 1.14 представлены средние концентрации пыли, образующейся в момент разгрузки скипов в приемные бункеры копров.

	0	~	v	
	nenuue vouueur	n_{0}	ασυτοπιστιστ ο Μοι	IAUT DODEDVOVU CVUTOD
$1 a_{0,1} m_{1,1} m_$	— Средние копцент		азующенся в мом	
1	1 1 1			

					Результаты			
		Температура,			измерения			
Примецацие	Наименование		Влажность,	ПДК,	запыленности,			
примечание	места отбора	$^{0}\mathrm{C}$	%	$M\Gamma/M^3$	МΓ	$/M^3$		
					Среднее	Среднее		
					значение	значение		
Отметка + 42 м,								
	Ствол № 4,	117	55	5	126.0			
Скип	отм. + 42 м,	11,/	55	5	120,9	1077		
разгружался	Ствол № 3,	12,1	50	5	88 5	107,7		
	отм. + 42 м,			5	88,5			
		Отметк	а 0 м					
	Ствол № 4,	15.2	51	5	175.0			
Скип	отм. 0 м	13,2	34	3	175,2	107.9		
разгружался	Ствол № 3,	0.0	60	5	80.4	127,8		
	отм. 0 м	9,9 00	3	00,4				

Как видно из таблицы средняя концентрация пыли на отметке + 42 м составляет 107,7 мг/м³, на отметке 0 м – 127,8 мг/м³.

С использованием данных, представленных в таблицах 1.11–1.14, сформирована «карта» интенсивности основных очагов пылеобразования условного вентиляционного ствола рудника 4 РУ (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – «Карта» интенсивности основных очагов пылеобразования условного вентиляционного ствола

Таким образом, экспериментальные исследования пылевой обстановки на действующих калийных рудниках показывают, что массовая концентрация пыли многократно (в некоторых случаях на порядки) превышает значения предельно допустимой концентрации на всей технологической цепочке, начиная от отбойки руды и заканчивая процессами подъема полезного ископаемого.

1.6 Применяемые и потенциально возможные способы борьбы с пылью на калийных рудниках

Единственным способом обеспыливания, применяемом на проходческо-добычных комбайнах, используемых на калийных рудниках, по сей день остается проветривание и пылеотсос с улавливанием пыли в тканевых фильтр-трубах (вентилятор с фильтр-трубой располагается со стороны, противоположной рабочему месту машиниста) [118].

Однако, как уже было сказано выше, при работе современных механизированных комплексов выделяется такое количество пыли, что справиться с ней (до значений ПДК) не представляется технически возможным (при используемых способах проветривания).

Ограничением в данном случае будут являться возможности средств вентиляции и нормативы, предусматривающие максимально допустимые скорости воздуха. Кроме того, область применения вентиляции для борьбы с пылью ограничивается критической скоростью воздуха, при которой происходит вторичное пылеобразование.

Низкая эффективность сухого пылеотсоса на работающих комбайнах обусловлена рядом причин.

Во-первых, тканевые фильтр-трубы обладают низкой степенью очистки, концентрация пыли в воздухе, выходящем из фильтр-трубы, составляет от 60 до 120 мг/м³ [107] (12–24 ПДК). Высокая пылевая нагрузка приводит к быстрому засорению и повышению аэродинамического сопротивления фильтр-трубы, что, в свою очередь, снижает производительность вентилятора.

Во-вторых, взаимное расположение фильтр-трубы и устья нагнетательного воздуховода в забое относительно рабочего места, а также влияние местных конвективных потоков от нагретых поверхностей комбайна не позволяют добиться минимальной запыленности в зоне дыхания машиниста;

В-третьих, на комбайнах отсутствует разветвленная система воздухоприемников, а спектр всасывания вентиляторов не превышает одного-двух диаметров приемного отверстия, что составляет 0,6–1,0 м. При этом размеры пыленесущих вихрей, сформированных в призабойной части выработки, намного превышают размеры спектра всасывания;

В-четвертых, производительность вентиляторов пылеотсоса при работе на фильтртрубу составляет от 0,5 до 1,5 м³/с (в зависимости от состояния фильтр-трубы), что намного меньше количества свежего воздуха, поступающего в забой. Заметим, что опыт эксплуатации систем пылеотсоса, представлен в работах [86, 89];

В-пятых, большая скорость выхода воздушной струи в забой из нагнетательного воздуховода (порядка 10 м/с), значительно выше критической скорости воздуха, обеспечивающей вторичную запыленность из-за взметывания осевшей пыли.

Невозможность справиться с пылью средствами вентиляции, привело к тому, что в подготовительных и очистных забоях угольных шахт применяется весь спектр известных современных методов, таких как предварительное увлажнение угля в массиве, орошение на горных машинах, пылеотсосы с последующей очисткой воздуха, пылеподавление пеной [147, 5,10,11, 35, 51, 76, 87, 146, 145, 59], основой которых является использование воды.

Однако стоит отметить, что, несмотря на многообразие различных способов борьбы с пылью на рудниках и угольных шахтах (в том числе и за рубежом) [175, 176, 177, 178, 180,

181, 184, 185, 186, 192, 201, 219], и отсутствие ограничений на использование воды добиться значений концентраций пыли, соответствующих ПДК, в атмосфере рабочих зон во время технологического процесса сложно, в связи с чем «Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по борьбе с пылью в угольных шахтах» вводят понятие «технически достижимого уровня» запыленности воздуха (ТДУ), отличного от ПДК.

ТДУ запыленности воздуха определяют при работе всех технических устройств, предназначенных для борьбы с пылью, предусмотренных документацией по ведению горных работ, и утверждаются в 1,25 раза выше среднего значения результатов замеров содержания пыли в рудничном воздухе. При этом установлены следующие значения ТДУ:

- 150 мг/м³ в рудничном воздухе после обеспыливающей завесы в исходящих из подготовительных и очистных забоев вентиляционных струях;
- 250 мг/м³ в рудничном воздухе на рабочих местах в подготовительных и очистных забоях [130].

В отличие от угольных шахт на калийных рудниках применение воды в системах обеспыливания связано с серьезными трудностями: отсутствием достаточного количества воды, поскольку пространственно большие калийные рудники традиционно не имеют систем подземного водоснабжения; нодопустимость переувлажнения гигроскопичных пород, так как оно приводит к слеживаемости и образованию агрессивной среды, которая опасна быстрым коррозионным износом оборудования [115].

Тем не менее, в своей работе Овсянкин А.Д. [123] предлагает и обосновывает возможность применения ряда «мокрых» способов обеспыливания для калийных рудников. Он отмечает, что проведенные в комбайновых забоях испытания систем с орошением форсунками механического и пневматического типов, воздушно-механической пеной, и водо-воздушным душированием являются высокоэффективными при правильном подборе расхода воды. Снижение концентрации пыли в забое до значений 20–50 мг/м³ достигается при следующих расходах:

— орошение форсунками механического типа – 4,5 л/т;

— орошение форсунками пневматического типа – 1,3 л/т;

— гашение воздушно-механической пеной – 2,5 л/т;

— водовоздушным душированием – 0,9 л/т.

При производительности современного комбайна порядка 8 т/мин для вышеописанных методов понадобится расход воды от 7,5 л до 36 л в минуту, т. е. порядка

2 кубометров в час. Это очень большой объем воды, доставка которого в забой весьма проблематична.

В целом наблюдения показали, что применение различных способов орошения позволяет снизить первоначальную запыленность воздуха на рабочем месте машиниста комбайна примерно в 10 раз, однако остаточная запыленность все равно намного выше ПДК. Дальнейшее снижение запыленности связано с резким увеличением расхода диспергированной воды.

Основными недостатками пылеподавления с помощью орошения в комбайновых забоях являются:

- недостаточное диспергирование воды, даже при орошении форсунками пневматического типа свыше 50 % всех водяных капель имеют размеры более 30–40 мкм;
- высокая плотность водяного факела, при котором не удается создать равномерное насыщение влагой всей зоны пылеобразования [94].

Этих недостатков лишен метод, предполагающий использование водяного пара. Водяной пар для пылеподавления применяется в случаях, когда недопустимо переувлажнение пылящего материала, при борьбе с пылью в условиях отрицательных температур, в комплексе с распыляемой водой [18,34,48,63,132,133,183,204,206].

При этом для борьбы с гигроскопичной пылью важно не количество пылинок, вошедших в непосредственный контакт с каплей воды, а насколько пересыщен воздух водяными парами в зоне повышенной запыленности. Наиболее эффективный способ постоянного поддержания относительной влажности воздуха выше порога гигроскопичности – подача паровоздушной смеси непосредственно в очаг повышенного пылеобразования.

Реализация данной задачи осуществлялась с помощью разработанной системы пылеподавления паром низких параметров. В своей работе [138] М.М. Сметанин предлагает использовать электрический трехэлектродный парогенератор. Корпус парогенератора выполнен из титанового листа толщиной 10 мм в виде цилиндра со съемными фланцами, на одном из которых установлены три графитовых электрода. Верхний фланец снабжен штуцером для отвода пара, а корпус - штуцером для подвода воды. В нижнем фланце имеется отверстие с заглушкой для слива воды при промывке парогенератора. Напряжение на электроды подается через шпильки, к которым подключаются токоведущие жилы электрического кабеля. При наполнении парогенератора водой электроды частично погружаются в воду, через которую проходит электрический ток, нагревают ее и

превращают в пар. С увеличением расхода воды пропорционально растет количество генерируемого пара. Устойчивая работа парогенератора сохраняется при расходах воды от 0,05 до 1,1 л/мин. При прекращении подачи воды в парогенератор ее уровень понижается, вода перестает касаться электродов и процесс генерации пара прекращается. Эффективность подавления пыли зависит от парового факела и его характеристик, которые, в свою очередь, зависят от конструкции паровой форсунки. Рекомендуется использовать специальную кольцевую паровую форсунку с изменяющейся шириной и углом раскрытия щелевого сопла.

Экспериментальный парогенератор имел следующие характеристики:

— производительность (по воде) - 0,2–1,2 кг/мин;

— номинальное давление пара в котле – 0,5 Мпа;

— частота переменного тока – 50 Гц;

— напряжение – 380 B;

—число фаз 3;

— габаритные размеры $-0.5 \times 0.6 \times 0.7$ м;

— масса 15-40 кг (в зависимости от модификации);

Испытание парогенератора проводилось в горных выработках калийных рудников. Эффективность осаждения пыли по длине выработки определялась на расстоянии 10, 25, 50 м от паровой завесы и составила соответственно 75, 80 и 90 %.

Опробование схем подачи пара [116] показало, что при свободной площади сечения выработки до 4 м² (типичные сечения сегодня 15-25 м²) максимальный эффект достигается при выпуске пара непосредственно в призабойную часть перед щитом со стороны расположения нагнетательного трубопровода на высоте 0,5-0,7 м от почвы. При такой схеме пар, подчиняясь конвективной силе, поднимается к кровле выработки, проходит над конвейером комбайна и, охлаждаясь опускается с противоположной стороны, полностью изолируя свободное пространство около щита.

При большей площади свободного сечения выработки более рациональным оказывается выпуск пара за оградительный щит в нижней его части, в зоне работы бермовых фрез. Кроме того, при любой схеме разводки пара обязательна подача его к пунктам погрузки руды в бункер-перегружатель и самоходный вагон, что очень осложняет работу добычного комплекса.

Зависимость запыленности воздуха на рабочем месте машиниста комбайна от удельного расхода пара имеет вид:

$$P = 630 - 1300 \frac{q_{\Pi}}{P_0}$$
, мг/м³

где q_п – расход пара, л/с; Р₀ – начальная запыленность до выпуска пара, мг/м³; Р – запыленность после подачи пара.

Расход пара в зависимости от производительности комбайнового комплекса можно вычислить по следующей формуле:

$$q_{_{
m II}}=0.19 J(630-P_{_{
m H}})$$
, л/мин

Таким образом, способ пылеподавления паром показал свою принципиальную эффективность и, одновременно, техническую неприспособленность к условиям тупикового комбайнового забоя. Стоит отметить, что на сегодняшний день парогенераторов, предназначенных для использования в подземных условиях калийного рудника, не существует, и проведение эксперимента в подготовленных условиях показывает лишь потенциал самого принципа использования пара. Практическое применение метода в реальных условиях подземного горного производства гораздо сложнее.

Еще более «фантастическим» для условий подземной добычи, особенно на газовых рудниках, являются предложения использовать для борьбы с калийной пылью электрический способ очистки воздуха. Отмечается, что осаждение частиц из запыленного потока определяется электрофизическими свойствами пыли; удельным электрическим сопротивлением, диэлектрической проницаемостью, электрозаряженностью. Кроме перечисленных свойств влияют и другие факторы; разность потенциалов на осадительных и коронирующих электродах, скорость воздушного потока, влажность и состав воздуха (газа), размеры и форма частиц, режим встряхивания и вибрация осадительных электродов, степень чистоты электродов, обратная корона [32], минералогический состав и удельный вес пыли.

На экспериментальной установке электрофильтра в лаборатории рудничной вентиляции и охраны труда Ленинградского горного института исследовалась степень очистки от пыли в зависимости от разности потенциалов на коронирующих и осадительных электродах электрофильтра, от скорости воздушного потока и относительной влажности воздуха. Пыль для исследований отбиралась у различных источников в рудниках Старобинского, Прикарпатского калийных и Артемовского каменносоляного месторождений.

Экспериментально установлено, что эффективность очистки воздуха пластинчатыми электрофильтрами при скорости движения воздуха 0,5 -2,5 м/сек и его относительной влажности от 80 до 82% составляет: для сильвинитовой пыли - 99,8- 94,6 %;

галитовой - 99,8 - 95,1 %; карналлитовой - 99,4 - 96,8 %, при средней концентрации пыли в воздухе до 1000 мг/м³ (200 ПДК). Данных о проведении экспериментальных исследований в натурных условиях действующего рудника нет, скорее по всему из-за того, что это чисто лабораторный метод, абсолютно, на наш взгляд, не приспособленный для условий подземной добычи и очень опасный в этих условиях, поскольку легко может инициировать взрыв горючей метано-воздушной смеси.

Несмотря на многообразие представленных выше способов борьбы с пылью на калийных рудниках в течение последних 40 лет (и по сей день) данные способы не применяются. Это свидетельствует о том, что их достоинства перечёркиваются двумя факторами: отсутствием постоянного водоснабжения в сети горных выработок калийных рудников и неудобством их применения на практике.

Единственным применяемым способом в настоящее время (как и 40 лет назад) остается использование вентилятора пылеотсоса с последующей очисткой запыленного воздуха в тканевом рукаве. По нашему мнению, наличие этого вентилятора лишь имитирует наличие пылезащиты, но не более.

В связи с этим, решение проблемы негативного влияния на здоровье горнорабочих соляного аэрозоля и ядовитых примесей, выделяющихся из массива горных пород, лежит именно в повышении эффективности проветривания рабочих зон (зон дыхания) добычных и проходческих забоев с применением существующего оборудования, либо с применением новых разработок. Для этого необходимо детальное изучение динамики пылегазовоздушных потоков в рабочей зоне, в области непосредственного нахождения горнорабочего. Достичь этого возможно путем натурных исследований, разработки физической (и математической) модели турбулентного переноса соляных частиц и газовых примесей. Используя полученную модель, учитывающую особенности движения локальных воздушных потоков, являющихся носителями как взвешенных частиц, так и газовых примесей, можно проводить значительное количество численных экспериментов.

1.7 Модели турбулентного конвективно-диффузионного переноса пыли в протяженной горной выработке

Основными математическими моделями описания динамики пылевой обстановки являются нуль-мерные (по терминологии Г.З. Файнбурга) модели, так называемого, «газового баланса», описывающие временное изменение средней по объему (например, забоя или камеры) концентрации пыли.

В то же время, для описания распространения пыли вдоль протяженных выработок в настоящее время широко применяются одномерные, квазиодномерные (осредненные по

сечению) и двумерные (осесимметричные) уравнения, различными приемами сводимые к формально «одномерным» уравнениям конвективно-диффузионного массопереноса.

Благодаря одномерности данные модели позволяют проводить быстрые расчеты (в ряде случаев даже получить аналитические решения).

Так, в работе [162] предложена математическая модель проветривания тупиковых выработок нагнетательным способом, в которой для расчета пространственной концентрации пыли C(x,r,t) используется заданная, не зависящая от продольной координаты функция изменения скорости воздушного потока по сечению $\vartheta(r)$.

При этом динамика концентрации пыли в зоне смешения задавалась как решение нуль-мерного уравнения массопереноса, представляющая собой экспоненциально убывающую функции времени:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_0 \vartheta(r) \frac{\partial C}{\partial x} = D \left[\frac{\partial C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right], \quad x > 0, t > 0,$$

$$C(x, r, t) |_{x=0} = C_1 exp \left(-\frac{QK}{V} t \right),$$
(1.1)

где u_0 - максимальная скорость потока, D - коэффициент турбулентной диффузии, Q - расход через трубопровод, C_1 - начальная максимальная концентрация пыли в зоне смешения, V - объем зоны смешения, а K - коэффициент турбулентной диффузии свободной струи.

Для описания накопления пыли в каналах вентиляторов главного проветривания в работе [163] предполагалось постоянство концентрации и скорости потока по высоте канала, что позволило получить аналитические решения одномерного уравнения диффузии с учетом осаждения:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - bC, \quad x > 0, t > 0.$$
(1.2)

Здесь *и* - средняя по расходу скорость потока, *D* - коэффициент турбулентной диффузии для пыли, *b* - коэффициент осаждения пылевых частиц.

Важным вопросом моделирования пылепереноса является определение условий отрыва частиц, отложившихся на стенках и почве выработки, и вовлечения их в движущийся поток газовзвеси. Попытка учесть это явление предпринята в работе [23], использующей уравнение диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C - (\mathbf{v} + \mathbf{v}_g) \cdot \nabla C, \qquad (1.3)$$

где **V** - средняя скорость потока, **V**_g - скорость гравитационного осаждения пыли (при выпадении ее из потока) или скорость ее взметывания (при переходе в поток), D - коэффициент диффузии, ∇ - оператор градиента (набла).

Уравнения, близкие по форме к (1.3) используются также в моделях вовлечения в процессы конвективно-диффузионного переноса пыли, отложившейся в почве карьера [148,33,90].

Наиболее полная одномерная многокомпонентная модель проветривания сети выработок шахты представлена в работе [15]. Она учитывает: эффекты турбулентной вязкости и теплопроводности с использованием интегральных коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок и мест их пересечения, которые определяются экспериментально; естественную конвекцию неизотермического газа при его движении в наклонных выработках, а также за счет неоднородного распределения легких примесей в рудничной атмосфере. Для прогнозирования влияния естественной конвекции на аэродинамику рудничной атмосферы учитывается теплообмен между рудничной атмосферой и стенками выработок, а также изменение температуры стенок при теплообмене. Модель применялась для разработки подхода к управлению вентиляцией сети выработок угольной шахты, при расчетах задавались параметры, соответствующие реальной топологии сети выработок и характеристик вентиляционного оборудования.

Более полное описание одномерных и двумерных моделей переноса аэрозолей можно найти в работе [17].

В последние десятилетия, благодаря значительному прогрессу в области вычислительной техники, появилась возможность проведения расчетов трехмерных уравнений движения воздушных потоков и аэрозольных примесей в сети горных выработок. Использование трехмерного моделирования дает дополнительные возможности для более точного и комплексного решения многих задач динамики рудничной атмосферы, например, таких как разработка методов направленного (локального) гидрообеспыливания [216]; модернизация и оптимизация вентиляционной системы горных выработок с целью повышения эффективности очистки и снижения экономических затрат [174,]; моделирование аварийных ситуаций и разработка методов их локализации и предотвращения [189].

1.8 Трехмерные модели турбулентного движения многофазных потоков, содержащих аэрозольные частицы

Подходы к математическому описанию многофазных сред. Сложность динамики потоков пылевых аэрозолей обусловливает наличие различных подходов, используемых в настоящее время для их описания. Так, в зависимости от физических параметров среды (дисперсности, концентрации, химической активности), режимов и геометрии потока, а также целей исследования пылевые аэрозоли моделируют как гомогенными многокомпонентными средами, так и многофазными гетерогенными текущими средами.

При теоретическом описании потоков многофазных жидкостей в зависимости от концентрации и дисперсности частиц конденсированной фазы используются, в основном, два подхода.

Первый подход основан на Лагранжевом (траекторном) описании дисперсной фазы, т.е. решении уравнений движения и энергии вдоль траекторий отдельных частиц по заранее рассчитанным из уравнений баланса параметрам несущего потока, рассматриваемого как непрерывная среда. После завершения расчета движения частиц происходит вычисление значений дополнительных (добавочных) источниковых членов. Они вносят поправки в уравнения движения газовой фазы, связанные с влиянием примеси на поток.

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{v}_f) = J_{fp}, \qquad (1.4)$$

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f \mathbf{v}_f}{\partial t} + (\mathbf{v}_f \cdot \nabla) \alpha_f \rho_f \mathbf{v}_f = -\alpha_f \nabla p + \alpha_f \nabla \cdot \mathbf{\sigma}_f + \mathbf{P}_{fp} + \alpha_f \rho_f \mathbf{g}, \qquad (1.5)$$

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f E_f}{\partial t} + (\mathbf{v}_f \cdot \nabla) \alpha_f \rho_f E_f = \alpha_f \nabla \cdot (\mathbf{\sigma}_f \cdot \mathbf{v}_f - \mathbf{q}_f) + \alpha_f \rho_f \mathbf{g} \cdot \mathbf{v}_f, \qquad (1.6)$$

$$\frac{d\boldsymbol{v}_p}{dt} = \frac{\boldsymbol{v}_f(\boldsymbol{R}_p, t) - \boldsymbol{v}_p}{\tau_p} + \boldsymbol{\Sigma} \boldsymbol{F}, \quad \frac{d\boldsymbol{R}_p}{dt} = \boldsymbol{v}_p.$$
(1.7)

Здесь индексы f и p соответствуют основной (жидкой) и дисперсной (частицы) фазам, α - объемные фракции, J_{fp} - интенсивность массообмена между фазами, \mathbf{P}_{fp} - слагаемое, характеризующее обмен импульса между фазами, \mathbf{R}_p , \mathbf{V}_p - координата и скорость частицы, F- силы различной физической природы, набор которых варьируется в зависимости от исследуемой среды, и обычно включает силы тяжести и Архимеда, а также силы межфазного взаимодействия.

Добавление большего количества сил к модели повышает точность учета физики явления, но также и увеличивает сложность решения. Связь между непрерывной и дисперсной фазами достигается через слагаемые-источники, которые включают в правые части уравнений.

Учет в рамках данного подхода случайного характера движения частиц, обусловленного взаимодействием с турбулентными вихрями несущего потока, приводит к необходимости решения стохастических уравнений движения и энергии типа Ланжевена вдоль траекторий отдельных частиц с последующим осреднением решений по ансамблю начальных данных. В этом случае с уменьшением размера частиц репрезентативное число реализаций должно возрастать, т. к. увеличивается вклад взаимодействия частиц с вихрями все меньших размеров. Дополнительные сложности связаны с учетом столкновений, коагуляции, дробления и зародышеобразования.

Лагранжев (траекторный) подход, в сочетании с методами прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulations, DNS) или крупных вихрей (Large Eddy Simulations, LES), позволяет получать детальную информацию о взаимодействии частиц с турбулентными вихрями, со стенками и друг с другом, однако требует очень больших затрат времени при расчете сложных течений, встречающихся в природных или промышленных условиях. Несмотря на это, данный подход часто используется при моделировании рудничной атмосферы с учетом пыли [218, 207], при этом несущую (газововоздушную) среду рассматривают отдельно в качестве многокомпонентной жидкости, выделяя в ней различные фракции, например, воздух, воду, метан и т. д, и используют для ее описания вместо уравнений (1.4)-(1.6) уравнения для многокомпонентных сред.

Второй подход (Эйлеров, континуальный) основан на введении понятия многоскоростной многотемпературной взаимопроникающей среды, т. е. среды, в каждой точке которой имеется столько скоростей и температур, из какого количества фаз состоит при этом рассматривается среда. Пылевой аэрозоль как совокупность двух взаимопроникающих континуумов – газа и частиц, имеющих собственные значения скорости, температуры, «плотности» (концентрации частиц), но не имеющих давления. Фазы рассматриваются отдельно, и для каждой фазы решается набор уравнений сохранения. Связь между фазами достигается за счет совместного давления и коэффициентов межфазного обмена. В дополнение к обычным уравнениям сохранения для каждой фазы также решается уравнение переноса для объемной доли $lpha_k$. Сумма объемных долей должна быть равна единице.

Ниже приведены основные уравнения для мультижидкостной модели с *k* непрерывными фазами:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{v}_k) = \sum_i J_{ki}, \qquad (1.8)$$

$$\frac{\partial \rho_k \mathbf{v}_k}{\partial t} + (\mathbf{v}_k \cdot \nabla) \rho_k \mathbf{v}_k = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{\sigma}_k + \sum_i \mathbf{P}_{ki} + \rho_k \mathbf{g}_k, \qquad (1.9)$$

$$\frac{\partial \rho_k E_k}{\partial t} + (\mathbf{v}_k \cdot \nabla) \rho_k E_k = \nabla \cdot (\mathbf{\sigma}_k \cdot \mathbf{v}_k - \mathbf{q}_k) + \rho_k \mathbf{g}_k \cdot \mathbf{v}_k + \sum_i E_{ki}, \qquad (1.10)$$

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \boldsymbol{v}_k) = 0, \qquad (1.11)$$

где \mathbf{V}_k , ρ_k , $E_k = (u_k + v_k^2/2)$ – скорость, плотность и удельная энергия каждой непрерывной фазы, p – давление, $\mathbf{\sigma}_k$ – тензор напряжения, \mathbf{q}_k – поток тепла, J_{ki} , \mathbf{P}_{ki} и E_{ki} – величины, которые характеризуют интенсивность перехода массы, обмена импульсом и энергией между k-й и i-й фазами, соответственно, при этом $J_{ki} = -J_{ik}$, $\mathbf{P}_{ki} = -\mathbf{P}_{ik}$, $E_{ki} = -E_{ik}$. В результате проблема описания многофазного движения в рамках Эйлерова (многоскоростного) подхода сводится к определению величин, описывающих внутрифазные ($\mathbf{\sigma}_k$, \mathbf{q}_k) и межфазные (J_{ki} , \mathbf{P}_{ki} , \mathbf{E}_{ki}) взаимодействия.

Существенным преимуществом Эйлерова (континуального) подхода по сравнению с Лагранжевым (траекторным) моделированием является использование балансных уравнений одного типа для обеих фаз и, соответственно, единого алгоритма решения всей системы уравнений. Кроме того, описание динамики очень мелких частиц не вызывает никаких принципиальных трудностей, т. к. при стремлении массы частицы к нулю осуществляется предельный переход к задаче о турбулентной диффузии безынерционной (пассивной) примеси. Кроме того, в этой модели учет столкновений и изменений числа частиц не приводит к значительному росту объема или усложнению вычислений. Применение данного подхода к моделированию рудничной атмосферы приведено в работе [210].

В целом Лагранжев траекторный и Эйлеров континуальный методы моделирования дополняют друг друга, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки и, следовательно, свои области приложения. Лагранжев метод применим для существенно неравновесных течений (крупные инерционные частицы, разреженные дисперсные среды), а Эйлеров метод справедлив в условиях, близких к равновесным (мелкие малоинерционные частицы, концентрированные дисперсные среды). В работе [196] разработан гибридный Лагранжево-Эйлеров подход, сочетающий детальность Лагранжевого и эффективность Эйлерового подходов к описанию дисперсных фаз. Все эти подходы могут быть применены для условий рудничной атмосферы калийных рудников.

1.9 Цель и задачи исследований

На основании проведенного анализа существующего положения дел в области борьбы с пылью на калийных рудниках сформулирована следующая цель исследования разработка методов нормализации и управления пылевой обстановкой в горных выработках калийных рудников средствами вентиляции.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- 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.
- 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.

- Предложить технические решения по снижению массовой концентрации соляного аэрозоля в длинных очистных забоях (лавах), а также в поверхностном разгрузочном комплексе.
- 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 для аналитического комплекса «Аэросеть», позволяющий моделировать распространение сильвинитовой пыли по шахтной вентиляционной сети.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СОЛЯНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В СИСТЕМЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

2.1 Сетевая модель конвективно-диффузионного переноса соляной пыли

Теоретический анализ закономерностей движения пылевоздушной смеси в системах горных выработок крайне важен для разработки эффективных методов и мероприятий по снижению запыленности воздуха в калийных рудниках, поскольку современный калийный рудник обладает разветвлённой системой горных выработок, в которой расположено множество источников пылеобразования. Кроме того, знание динамики соляного аэрозоля необходимо в силу того, что на калийных рудниках широко применяются системы частичного повторного использования воздуха, при которых 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 горной выработке, 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.

В рамках сетевых моделей массопереноса будем рассчитывать стационарное распределение воздушных потоков по правилам Кирхгофа I-го (для узлов сети) и II-го рода (для контуров сети и входящих в них ветвей) [188],

$$\sum_{i \in V_j} Q_i = 0, \tag{2.1}$$

$$\sum_{i \in \tilde{C}_k} (H_i - R_i Q_i | Q_i |) = 0, \qquad (2.2)$$

а нестационарное распределение пыли в протяженной горной выработке - ветви вентиляционной сети – с помощью конвективно-диффузионного уравнения вида:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{Q_i}{S_i} \frac{\partial C_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) - \lambda_i C_i + F_i , \qquad (2.3)$$

Здесь Q_i – расход воздуха в горной выработке № і, м³/с; H_i – депрессия источника тяги в горной выработке № і, Па; R_i – аэродинамическое сопротивление горной выработки № і, $H \cdot c^2/M^8$; C_i – концентрация соляного аэрозоля по длине х горной выработки № і, мг/м³; S_i – сечение горной выработки № і, м²; D_i – коэффициент эффективной продольной диффузии аэрозоля, м²/с; λ_i – параметр, характеризующий скорость уменьшения концентрации соляного аэрозоля за счет его оседания на почву и стенки горной выработки, 1/с; F_i – интенсивность образования пыли в источнике пыления, мг/м³/с; t – время, с; x – координата вдоль выработки, м; \tilde{C}_k – множество горных выработок, входящих в контур № k.

При этом параметр «осаждения» соляной пыли λ_i зависит, как минимум, от относительной влажности и температуры воздуха, а функция источника пыления F_i – от относительной влажности воздуха и производительности комбайна.

В случае существенного изменения относительной влажности и температуры воздуха в вентиляционной сети рудника систему (2.1) – (2.3) следует дополнять соответствующими уравнениями переноса для относительной влажности и температуры [188, 200].

Граничными условиями для уравнения (2.3) служат значения концентрации пыли в местах сопряжения горных выработок – узлах. 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:

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

Здесь Q_{Σ} – суммарных расход воздуха через сопряжение, м³/с; $Q_j^{(out)}$ – расход воздуха в смежной выработке № j.

Важную роль в уравнении (2.3.) играет коэффициент эффективной продольной диффузии *D*, который представляет собой сумму коэффициентов молекулярной диффузии, турбулентной (мелковихревой) диффузии и вызванной крупной структурой однонаправленного движения диффузии Тейлора (точнее - дисперсии).

Молекулярная диффузия определяется физическими свойствами воздуха и его примесей. Поскольку основными составляющими воздуха являются азот с коэффициентом молекулярной диффузии $0,179 \times 10^{-4}$ и кислород с коэффициентом молекулярной диффузии $0,232 \times 10^{-4}$ (при температуре +25 °C), то значение молекулярной диффузии для воздуха можно принять равным $0,22 \times 10^{-4}$ или $2,2 \times 10^{-5}$ м²/с.

Величина коэффициента турбулентной диффузии *D_{Turb}* может быть определена с помощью числа Шмидта, показывающего соотношение интенсивностей турбулентной вязкости и турбулентной диффузии:

$$Sc = \frac{\nu_{Turb}}{D_{Turb}},\tag{2.4}$$

где *Sc* – число Шмидта, типовое значение которого для воздуха равно 0,7; v_{Turb} – турбулентная кинематическая вязкость, м²/с.

Значение турбулентной кинематической вязкости может быть определено, к примеру, из модели турбулентности Спаларта-Аллмарса [27]:

$$\nu_{T} = \tilde{\nu} f_{\nu 1}, \qquad (2.5)$$

$$f_{\nu 1} = \frac{\chi^{3}}{\chi^{3} + C_{\nu 1}^{3}}, \qquad (2.5)$$

$$\chi \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu_{\nu}}, C_{\nu 1}^{3} = 7.1,$$

где v_k – кинематическая вязкость, м²/с, \tilde{v} – модифицированная турбулентная вязкость, м²/с, f_{v1} – коэффициент пропорциональности.

Значение модифицированной турбулентной вязкости можно вычислить следующим образом:

$$\tilde{v} = \sqrt{\frac{3}{2}} v \cdot I(Re),$$

$$I(Re) = 0.16Re^{-1/8},$$

$$l = 0.07d,$$
(2.6)

где I (Re) – интенсивность турбулентного потока; v – скорость потока воздуха, м/с; Re – число Рейнольдса; d – диаметр выработки, м.

Таким образом, коэффициент турбулентной диффузии при значении числа Шмидта, равном 0,7, вычисляется следующим образом:

$$D_{Turb}(v, S, P) = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{v \cdot 0,064 \, Re^{-1/8} \cdot S \cdot f_{v1}}{P}},$$
(2.7)

где *S* – площадь сечения выработки, м²; *P* – периметр сечения выработки, м.

Коэффициент диффузии Тейлора (крупноструктурной дисперсии) для стационарного турбулентного режима течения по протяженной горной выработке может быть определен из уравнения:

$$D_{Taylor} = 3,57 \frac{P}{2\pi} v \sqrt{\Lambda}, \qquad (2.8)$$

где Λ – коэффициент трения, P – периметр сечения выработки, м.

Свяжем коэффициент трения и коэффициент аэродинамического сопротивления через уравнения депрессии в выработке из аэрологии и гидравлики:

$$h = \frac{\alpha P L}{S^3} V^2 S^2 -$$
из аэрологии
$$h = \frac{\lambda L \pi}{P} \frac{\rho V^2}{2} -$$
из гидравлики (2.9)

где α – коэффициент аэродинамического сопротивления, $H \cdot c^2/M^4$.

Из (2.9) в итоге получим:

$$\lambda = \frac{8\alpha}{\rho}.$$
(2.10)

Таким образом, получим окончательный вид выражения диффузии Тейлора:

$$D_{Taylor} = 3,57 \sqrt{\frac{2\alpha}{\rho} \frac{P}{\pi}} v.$$
 (2.11)

Другим важным параметром уравнения (2.3) является λ_i – параметр, характеризующий скорость уменьшения концентрации соляного аэрозоля за счет его оседания на почву и стенки горной выработки, 1/с.

Экспериментальное изучение закономерностей уменьшения средней (по сечению) концентрации соляного аэрозоля в горной выработке по ее длине позволяет определить параметр λ_i и, тем самым, частично параметризовать математическую модель динамики пылевоздушной смеси в системе горных выработок.

Для ее окончательной параметризации нужно знать закономерности генерации пыли на комбайновых комплексах и в длинных очистных забоях, что позволяет определить параметры F_i (интенсивность образования пыли в источнике пыления, мг/м³/с) и, тем самым, полностью замкнуть математическую модель динамики пылевоздушной смеси в системе горных выработок.

С этой целью нами проведен ряд экспериментальных исследований фракционного состава и распределения пыли в протяженных сквозных горных выработках и определены коэффициенты осаждения в условиях действующего рудника.

2.2 Пространственное распределение пыли в протяженных горных выработках и определение коэффициента осаждения

Для проведения натурного эксперимента, позволяющего оценить процессы оседания аэрозольных частиц различных фракций по длине выработки, был выбран вентиляционный штрек лавы длиной 350 м и сечением 8 м² (высота 3 м). На всем протяжении участка измерений штрек не имел ответвлений.

За начало координат было выбрано место пылеобразования.

По всей длине штрека через каждые 50 м на почве были расставлены 7 емкостей, объёмом 300 мл каждая, в которые осаждалась витающая пыль (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Фрагмент схемы расположения точек замера по длине горной выработки Осаждавшаяся в емкости пыль собиралась в течение суток, затем емкости герметично закрывались и распаковывались непосредственно перед проведением анализа.

Средняя скорость воздуха в вентиляционном штреке составляла 1,76 м/с. Относительная влажность воздуха, зафиксированная в месте отбора проб, оставляла 37,6 %, относительная влажность воздуха в лаборатории (в месте проведения анализа) – 26 %.

Исследование фракционного состава частиц проводилось в лаборатории геологии месторождений полезных ископаемых Горного института УрО РАН с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMH (Tescan) с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20.

Результаты оценки фракционного состава соляных пылеватых частиц на расстоянии 50 м от источника пылеобразования (точка № 1) приведены на рисунке 2.2. Подобные данные получены в каждой точке.



Рисунок 2.2 – а) Фотография частиц пробы под микроскопом, б) распределение частиц по размерам в пробе

На рисунке 2.2 хорошо видно различие скоростей оседания крупнодисперсной пыли и респирабельной фракции, которая к первой замерной станции не успела еще скольконибудь осесть.

С использованием данных, обработанных подобным образом во всех семи пробах, построены зависимости изменения состава пыли по длине выработки. Анализируя полученные результаты, можно заметить увеличение процентного содержания частиц мелкой фракции по мере удаления от источника пылеобразования. Это хорошо видно на графике, представленном на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Изменения процентного содержания частиц размерами до 10 мкм по мере удаления от источника пылеобразования

График показывает, что доля тонкодисперсных респирабельных частиц размерами до 10 мкм в общей совокупности аэрозольных частиц увеличивается при удалении от источника пылеобразования. В то же время доля частиц крупных фракций (21–30 мкм и частиц свыше 31 мкм в общей совокупности частиц снижается (рисунок. 2.4), что хорошо согласуется с литературными данными [135].



Рисунок 2.4 – Изменения процентного содержания частиц размерами 21–30 мкм и свыше 31 мкм по мере удаления от источника пылеобразования

Поскольку определение коэффициентов осаждения по размерам всех фракций довольно трудоемко, а в практике решения сетевых задач (в терминах средней по сечению массовой концентрации пыли) необходимо знать коэффициент осаждения пыли как некий феноменологический коэффициент стока примеси, был проведен специальный эксперимент по его определению.

Дополнительный эксперимент был проведен в условиях тупиковой выработки длиной 150 м, сечением 15,6 м² (рисунок. 2.5). 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 м³/с таким образом, что запыленный воздух двигался к устью выработки со скоростью 0,16 м/с. Относительная влажность воздуха была равна 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.

 1	2	3	4	5	6	7	
•	•	•	•	•	•	•	
			,				

Рисунок 2.5 – Расположение точек замера массовой концентрации пыли Характер падение концентрации пыли по мере удаления от источника

пылеобразования хорошо видно на рисунке 2.6. Снижение значений концентрации пыли

происходит монотонно, по слабо нелинейному закону. Слабость изменения была вызвана малостью длины выработки, что не позволяло увидеть экспоненциальный характер затухания. Заметим, что exp (- x) при малых x становится близкой к exp (-x) \cong (1-x) (первые два члена разложения в ряд Макларена). Именно такой характер изменения мы и наблюдаем на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Изменение массовой концентрации пыли по мере удаления от источника пылеобразования

Влияние влажности на закономерности движения соляной аэрозоли в горных выработках калийных рудников.

Как уже было сказано выше, знание закономерностей движения пылевоздушной смеси в системах горных выработок крайне важно для разработки эффективных методов и мероприятий по снижению запыленности воздуха в калийных рудниках.

В работе [46] с помощью модели движения соляного аэрозоля в горной выработке в поле действия силы тяжести получена удобная аналитическая формула для расчета уменьшения средней концентрации пыли (соляного аэрозоля) в сечении горной выработки по ее длине.

Однако вывод данной формулы содержит ряд существенных упрощений (например, предположение о том, что влажная частица соляного аэрозоля – жидкая капля, а течение автомодельно). Кроме того в работе [46] не пояснено как проводить анализ влияния относительной влажности воздуха на снижение концентрации пыли в горной выработке, в то время как проведение такого анализа крайне важно с учетом того, что повышение относительной влажности является одной из эффективных мер снижения запыленности горных выработок, а моделирование данного процесса позволило бы подбирать правильные параметры систем обеспыливания.

Поэтому нами был проведен более глубокий теоретический анализ закономерностей динамики частиц пылевого аэрозоля в горной выработке в поле действия силы тяжести.

При проведении теоретического анализа динамики соляного аэрозоля в горной выработке были приняты во внимание следующие физические процессы:

- 1. Конвективный перенос частиц аэрозоля вместе с воздушным потоком.
- Диффузионный перенос частиц аэрозоля вследствие турбулентного режима течения воздуха.
- 3. Оседание частиц аэрозоля на почву горной выработки под действием силы тяжести.
- 4. Коагуляция частиц аэрозоля в результате их абсолютно неупругих соударений.
- 5. Конденсационный рост частиц аэрозоля в результате поглощения влаги из воздуха.

Помимо этого, также предполагаются изотермичность и стационарность протекающих в горной выработке физических процессов.

Анализ динамики соляного аэрозоля в горной выработке проводится в рамках двумерной постановки задачи. Геометрически горная выработка задается как прямоугольная область высотой *h* и длиной *L* (см. рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Геометрия горной выработки

Система координат выбрана таким образом, что ось x направлена вдоль выработки, а ось z – вертикально. Центр системы координат находится в нижнем левом углу горной выработки. Воздушный поток движется слева направо. Слева, на входе в горную выработку задаются параметры соляного аэрозоля: скорость потока, начальная концентрация и начальный размер частиц аэрозоля. Продольная компонента скорости воздушного потока в горной выработке считается постоянной величиной. Вертикальная компонента скорости воздуха всюду равна нулю, в то время как вертикальная компонента скорости частиц аэрозоля переменна. Принимается, что на входе в горную выработку концентрация соляного аэрозоля однородно распределена по высоте. Физически ненулевая концентрация частиц соляного аэрозоля на входе в горную выработку может быть связана с влиянием некоторого источника пыления (например, работающего комбайна). Поскольку частицы аэрозоля в своем большинстве (более 99 %) имеют радиус более 0,1 мкм, число Кнудсена в данном случае мало и, следовательно, справедливо основное предположение гидроаэромеханики о сплошности (континуальности) среды.

Это позволяет свести задачу об изменении концентрации гигроскопичного аэрозоля по длине прямой горной выработки к решению стационарного двумерного уравнения конвективно-диффузионного переноса:

$$\frac{\partial V_x C}{\partial x} + \frac{\partial V_z C}{\partial z} = D_{Turb} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right).$$
(2.12)

Здесь V_x и V_z – компоненты скорости частиц аэрозоля в продольном (x) и вертикальном (z) направлении горной выработки соответственно, м/с; *C* – концентрация частиц аэрозоля, мг/м³; D_T – коэффициент турбулентной диффузии воздушного потока, м²/с.

По данным [169], эмпирическая формула для расчета коэффициента турбулентной диффузии при Re > 10000 следующая:

$$D_T = 0.044 \nu R e^{0.75}. \tag{2.13}$$

Здесь *v* – ламинарная кинематическая вязкость воздуха, м²/с; Re – число Рейнольдса воздушного потока.

Величина скорости частиц аэрозоля в продольном направлении равна средней скорости воздушного потока в горной выработке, которая при решении задачи является известным параметром. Величина скорости частиц в поперечном направлении горной выработки должна быть оценена исходя из анализа физических механизмов эволюции и оседания частиц на почву выработки в поле силы тяжести.

Если предположить, что радиус частиц аэрозоля достаточно мал (не более 35 мкм [161]), то можно воспользоваться приближением Стокса и получить следующее выражение для скорости оседания сферической частицы радиусом *r* в воздухе [46,161]:

$$V_z = -\frac{2}{9} \frac{r^2 g}{\nu}.$$
 (2.14)

Здесь g – ускорение свободного падения, м/с²; ν – ламинарная кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

Согласно [161], формула (2.14) позволяет рассчитывать динамику частиц размерами до 35 мкм в воздушном потоке в пределах погрешности 10 %. В случае, если размер частиц исследуемых аэрозолей больше 35 мкм, то необходимо использовать более точные зависимости (формулу Озеена и пр.).

На практике в каждой точке пространства горной выработки аэрозоль является полидисперсным [12]. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований (рис. 2.9) – в нем присутствуют частицы в широком диапазоне радиусов.

Полидисперсность аэрозоля связана как с полидисперсностью аэрозоля в месте его генерации, так и с активным массообменом в турбулентном воздушном потоке.





Рисунок 2.8 – а) Фотография частиц из пробы под микроскопом.

Рисунок 2.9 – б) Процентное содержание частиц по размерам в пробе.

Для простоты в предыдущих работах [169] принималось, что в каждой точке пространства горной выработки присутствуют частицы только одного радиуса. То есть использовалась гипотеза о локальной монодисперсности соляного аэрозоля. Трактовать эту гипотезу можно так: в произвольном элементарном объеме пространства выработки поведение реального полидисперсного соляного аэрозоля хорошо описывается монодисперсным аэрозолем с частицами некоторого эффективного среднего радиуса. При этом также важно учитывать, что в пространстве горной выработки происходит массоперенос посредством турбулентной диффузии, оказывающий влияние на это среднее значение радиуса частиц аэрозоля.

Сделанные допущения позволяют перейти от (2.12) к следующему уравнению переноса среднего радиуса г частиц аэрозоля (как некоторой скалярной характеристики потока):

$$\frac{\partial V_x r}{\partial x} + \frac{\partial V_z r}{\partial z} = D_T \left(\frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial z^2} \right) + R_{\kappa o a z} + R_{\kappa o \mu \partial}.$$
(2.15)

Здесь *R*_{конд} и *R*_{коаг} – слагаемые, отвечающие за конденсационный и коагуляционный рост частиц аэрозоля соответственно, м/с.

Согласно [1,193,194], конденсационный рост рассольной пленки на соляной частице может быть рассчитан по следующему уравнению:

$$R_{\kappa o \mu \partial} = \frac{D_T \mu_p \Delta P}{\rho_p R (T + 273, 15) r}.$$
(2.16)

Здесь $\mu_{\rm p}$ – молекулярный вес рассола, кг/моль; ΔP – разница между парциальными давлениями водяного пара в воздухе и на поверхности рассольной пленки частицы аэрозоля, Па; $\rho_{\rm p}$ – плотность рассола, кг/м³; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, °С.

Парциальное давление водяного пара на поверхности рассольной пленки частицы зависит от концентрации соли в этой пленке. В работе [46] предполагалось, что по мере роста частицы аэрозоля за счет конденсации влаги на ней, концентрация соли в рассольной пленке падает обратно пропорционально увеличению объема влажной частицы. Однако данный вывод, по нашему мнению, справедлив только в том случае, если в растущей влажной частице твердое соляное ядро полностью растворилось (случай жидкой капли). Вместе с тем на начальных стадиях конденсационного роста частиц аэрозоли это не справедливо: концентрация рассола поддерживается постоянной, равной предельному значению концентрации насыщенного раствора – это происходит до тех пор, пока возможна «подпитка солью». А с учетом того, что объемная концентрация насыщенного раствора соли NaCl составляет около 21 % [117], для того, чтобы вся соль растворилась во влажной пленке, радиус влажной частицы аэрозоля должен вырасти в 1,8 раза, а масса – в 2,5 раза.

Разница ΔP между парциальными давлениями водяного пара в воздухе и на поверхности рассольной пленки частицы аэрозоля в изотермическом случае линейно зависит от разницы относительных влажностей $\Delta \varphi$ в воздухе и на поверхности рассольной пленки:

$$\Delta P = \Delta \varphi \cdot P_{\scriptscriptstyle H} = \Delta \varphi \cdot 6,112 \exp\left(\frac{17,5T}{241.2+T}\right). \tag{2.17}$$

Относительная влажность воздуха вблизи поверхности рассольной пленки называется критической влажностью. Критическая влажность $\varphi_{\kappa p}$ для большинства солей практически не зависит от температуры и составляет для каменной соли 77 %, для сильвинита 67 %, а для карналлита – 50 %.

После того, как радиус влажной частицы аэрозоля вырастает в 1,8 раза, твердое ядро во влажной частице растворится, и концентрация рассола в капле начнет убывать, а вместе с

ней начнет возрастать критическая влажность, что замедлит или остановит последующий рост рассольной капли.

Поэтому формулу (2.17) следует модифицировать:

$$\Delta P = \left(\varphi - f\left(\varphi_{\kappa p}\right)\right) \cdot 6,112 \exp\left(\frac{17,5T}{241.2 + T}\right),\tag{2.18}$$

$$f(\varphi_{\kappa p}) = \varphi_{\mu} + \left(\varphi_{\kappa p} - \varphi_{\mu}\right) \min\left[1; \left(\frac{1, 8r_0}{r}\right)^3\right].$$
(2.19)

Здесь φ_{μ} – относительная влажность насыщенного водяного пара, %.

Коагуляционный рост частицы аэрозоля $R_{\kappa o a c}$ в турбулентном воздушном потоке может быть описан исходя из формулы (2.22) для числа столкновений частиц с заданной частицей в единицу объема за время dt [161]:

$$d\Phi = 4\pi D_T Rndt, \qquad (2.20)$$

где R – радиус коагуляции (приближенно равен 2r), м; n – общее количество частиц в единице объема аэрозоля, м⁻³. Строго говоря, эта формула применима только в случае, когда $D_T t/R^2 \gg 1$ или $t \gg 10^{-7}$ сек.

Если предположить, что в промежуток времени dt в единичном объеме пространства горной выработки масса частиц аэрозоля постоянна (т. е. справедливо $4\pi\rho r^3 n/3 = const$), то становится возможным рассчитать изменение среднего радиуса частиц аэрозоля вследствие их коагуляции:

$$R_{\kappa o a z} = \frac{dr}{dt} = -\frac{r}{3n} \frac{dn}{dt} = \frac{r}{6} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{4\pi D_T r^2 n}{3}.$$
 (2.21)

С учетом того, что общее количество частиц *n* в единице объема аэрозоля равно массовой концентрации аэрозоля *C*, деленной на массу одной частицы, формула (2.15) может быть переписана так:

$$R_{\kappa o a \epsilon} = \frac{4\pi D_T r^2}{3} \frac{C \cdot 10^{-6}}{\rho \frac{4\pi r^3}{3}} = \frac{D_T C \cdot 10^{-6}}{\rho r}.$$
 (2.22)

При этом плотность частицы ρ будет зависеть от соотношения воды и соли в ней. Множитель 10⁻⁶ учитывает то, что единица измерений концентрации аэрозоля – мг/м³.

В итоге получен разумный результат: с течением времени по мере увеличения радиуса частиц аэрозоля за счет коагуляции происходит замедление скорости роста радиуса. Это связано с тем, что при фиксированной концентрации аэрозоля *С* по мере роста среднего радиуса частиц в рассматриваемом малом объеме аэрозоля количество частиц *n*

уменьшается обратно пропорционально кубу радиуса частиц, а вероятность столкновения растет медленнее – прямо пропорционально квадрату радиуса частиц.

Примечательно, что аналогичная зависимость роста радиуса частицы от текущего значения радиуса наблюдается и для механизма конденсационного роста. Это также связано с тем, что по мере роста среднего радиуса частиц в рассматриваемом малом объеме аэрозоля приток влаги к пленке на частице прямо пропорционален площади сферической частицы, т. е. только квадрату радиуса частиц.

В настоящем исследовании был рассмотрен только один механизм коагуляции – турбулентная коагуляция. Однако существует еще такие виды коагуляции как броуновская, гидродинамическая, градиентная, акустическая. В работе [46] для случая горных выработок показано, что они дают существенно меньший вклад по сравнению с турбулентной коагуляцией, за исключением, быть может, тонкого пограничного слоя вблизи стенок горных выработок, где ярко выражена также градиентная коагуляция.

Согласно работе [161], в случае градиентной коагуляции вблизи стенки количество соударений частиц в единицу времени равно аналогичному количеству для турбулентной коагуляции с точностью до постоянного числового множителя. В работах [161,82] также указывается, что значение механизма турбулентной коагуляции является наиболее важным для частиц, диаметры которых составляют 10⁻⁵–10⁻⁴ см.

Для решения уравнений переноса концентрации и среднего радиуса частиц аэрозоля должны быть поставлены следующие граничные условия:

$$\left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \tag{2.23}$$

$$C|_{x=0} = C_0, \ \frac{\partial C}{\partial x}\Big|_{x=L} = 0,$$
(2.24)

$$\left. \frac{\partial r}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial r}{\partial z} \right|_{z=h} = 0, \tag{2.25}$$

$$r|_{x=0} = r_0, \ \frac{\partial r}{\partial x}\Big|_{x=L} = 0.$$
 (2.26)

Полученная система уравнений (2.12), (2.15), (2.18) – (2.19), (2.22) – (2.26) является замкнутой и позволяет определить распределения концентрации и среднего радиуса частиц аэрозоля в горной выработке, а также определить параметр λ, характеризующий скорость уменьшения средней по сечению концентрации соляного аэрозоля по длине горной выработки.

Для удобства теоретического анализа полученной системы уравнений ее следует обезразмерить, введя безразмерные переменные – продольную и вертикальную координаты X' и Z', концентрацию C' и радиус частиц R':

$$X' = \frac{x}{h}, \ Z' = \frac{z}{h}, \ C' = \frac{C}{C_0}, \ R' = \frac{r}{r_0}.$$
 (2.27)

В этом случае уравнения переноса концентрации (2.12) и среднего радиуса частиц (2.15) будут после преобразований иметь вид:

$$\frac{\partial C'}{\partial X'} - A \frac{\partial R'^2 C'}{\partial Z'} = \frac{1}{\operatorname{Pe}_T} \left(\frac{\partial^2 C'}{\partial X'^2} + \frac{\partial^2 C'}{\partial Z'^2} \right), \qquad (2.28)$$

$$\frac{\partial R'}{\partial X'} - A \frac{\partial R'^3}{\partial Z'} = \frac{1}{\operatorname{Pe}_T} \left(\frac{\partial^2 R'}{\partial X'^2} + \frac{\partial^2 R'}{\partial Z'^2} \right) + \frac{1}{\operatorname{Pe}_T} \frac{K}{R'}.$$
(2.29)

Данная система уравнений содержит три безразмерных комплекса:

$$\operatorname{Pe}_{T} = \frac{V_{x}h}{D_{T}},\tag{2.30}$$

$$A = \frac{2}{9} \frac{gr_0^2}{\nu V_x},$$
 (2.31)

$$K = \frac{h^2}{r_0^2} \left(\frac{\mu_p \Delta P(R')}{\rho_p R(T + 273, 15)} + \frac{C_0 C'}{\rho(R')} \cdot 10^{-6} \right).$$
(2.32)

Граничные условия в обезразмеренном виде запишутся так:

$$\left. \frac{\partial C'}{\partial Z'} \right|_{Z'=0} = \left. \frac{\partial C'}{\partial Z'} \right|_{Z'=1} = 0, \tag{2.33}$$

$$C'|_{X'=0} = 1, \ \frac{\partial C'}{\partial X'}|_{X'=L/h} = 0,$$
 (2.34)

$$\frac{\partial R'}{\partial Z'}\Big|_{Z'=0} = \frac{\partial R'}{\partial Z'}\Big|_{Z'=1} = 0, \qquad (2.35)$$

$$R'|_{X'=0} = 1, \ \frac{\partial R'}{\partial X'}|_{X'=L/h} = 0.$$
 (2.36)

Система (2.28) – (2.29) является нелинейной и, скорее всего, не имеет точного аналитического решения. Численное решение системы (2.28) – (2.36) осуществляли с использованием метода конечных разностей в пакете компьютерной алгебры Wolfram Mathematica. Анализ проводился для следующего набора параметров задачи (см. табл. 2.1). Данные параметры соответствуют вентиляционному штреку одной из лав на руднике ОАО «Беларуськалий», на котором проводились экспериментальные замеры пространственного распределения концентрации аэрозоля калийной соли.

Таблица 2.1 – Параметры задачи

Параметр	Значение
Высота горной выработки, м	2,8
Длина горной выработки, м	300
Средняя скорость воздуха в горной выработке. м/с	1,75
Температура воздуха, °С	20
Кинематическая вязкость воздуха	1,5.10-5
Начальное значение радиуса частиц аэрозоля, мкм	10
Начальная концентрация пыли, мг/м ³	600
Относительная влажность, %	37,5
Критическая относительная влажность, %	67
Молекулярный вес насыщенного рассола кг/моль	0,022
Плотность воды, кг/м ³	1000
Плотность соли, кг/м ³	2000
Универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К)	8,31
Коэффициент молекулярной диффузии воздуха, м ² /с	0,00007

При указанных значениях параметров задачи значения трех безразмерных комплексов на левой границе расчетной области (C' = R' = 1) равны: Ре_T ≈ 543 , $A \approx 8,3 \cdot 10^{-6}$, $K \approx 23520$. При этом в безразмерном комплексе К первое слагаемое равно нулю, так как относительная влажность воздуха ниже критической влажности и, следовательно, конденсации влаги на частицах аэрозоля не происходит. На рис. 2.9 представлены рассчитанные распределения безразмерных концентраций и среднего радиуса частиц аэрозоля.


Рисунок 2.9 – Распределения безразмерных концентраций (а) и среднего радиуса частиц аэрозоля (б)

Из рис. 2.9 (а) видно, что концентрации аэрозоля распределены неравномерно по горной выработке и убывают по мере продвижения воздушного потока слева направо. Распределение концентраций аэрозоля имеет выраженную асимметрию, что обусловлено влиянием конвективного слагаемого в вертикальном направлении Z'. Из рис. 2.9 (б) видно, что в результате коагуляционного роста частиц аэрозоля величина среднего радиуса сначала растет и достигает величины около 40. При этом область, на которой средний радиус имеет максимальное значение, находится вблизи почвы горной выработки. За счет возрастающего влияния силы тяжести частицы аэрозоля с таким радиусом быстро оседают на почву выработки и не успевают продвинуться дальше по выработке. В дальнейшем по мере продвижения воздушного потока по длине горной выработки происходит уменьшение среднего размера частиц.

Анализ изменения основных характеристик соляного аэрозоля по длине горной выработки удобно проводить в терминах концентрации и радиуса аэрозоля, усредненных по поперечному сечению горной выработки. На рис. 2.10 представлены кривые для усредненной по поперечному сечению выработки концентрации аэрозоля при различных начальных концентрациях аэрозоля и различных относительных влажностях воздушного потока.



Рисунок 2.10 – Распределения средней по сечению концентрации аэрозоля при различных начальных концентрациях аэрозоля (а) и относительных влажностях воздушного потока (б)

Рисунок 2.10 (а) показывает закономерный результат: для более высоких начальных концентраций аэрозоля процесс оседания частиц на стенки горных выработок протекает быстрее вследствие более интенсивного процесса коагуляции частиц. Из рис. 2.10 (б) следует, что относительная влажность воздуха оказывает сильное влияние на оседание частиц аэрозоля – даже в том случае, когда относительная влажность воздуха превышает критическую влажность (67 %) всего на несколько процентов.

Как отмечалось выше, целью настоящего исследования является определение достаточно универсальной функциональной зависимости параметра λ от свойств воздушно-пылевого потока, движущегося по горной выработке. Для этого хотелось бы иметь приближенное аналитическое решение системы уравнений (2.27) – (2.36).

В простейшем случае аналитическое решение уравнения (2.28) при граничных условиях (2.34) – (2.35) может быть получено в предположении малости конвективного слагаемого в вертикальном направлении – в этом случае распределение концентрации аэрозоля станет независимым от среднего радиуса частиц аэрозоля. В уравнении (2.28) также можно отбросить слагаемое, отвечающее за диффузию в продольном направлении горной выработки, поскольку искомый параметр λ по своему смыслу не должен учитывать продольную диффузию.

$$\frac{\partial C'}{\partial X'} = \frac{1}{\operatorname{Pe}_T} \frac{\partial^2 C'}{\partial Z'^2},\tag{2.37}$$

Искомое аналитическое решение будет представлять собой ряд Фурье со следующим первым членом:

$$C' = \frac{4}{\pi} exp\left(-\frac{\pi^2 X'}{\operatorname{Pe}_T}\right) sin(\pi Z'), \qquad (2.38)$$

В ряду имеет смысл удержать только первый член, поскольку для рассматриваемых параметров задачи при X' > 6 доля остальных членов ряда в общем решении (сумме ряда) составляет менее 5 %. Соответствующий этому решению размерный параметр λ равен:

$$\lambda = \frac{\pi^2}{\text{Pe}_T} \frac{1}{h} = \frac{\pi^2 D_T}{h^2 V_x},$$
(2.39)

Следует отметить, что решение (2.38) получено при наборе граничных условий, отличных от (2.33) – (2.34). Граничное условие на выходе из расчетной области не использовалось по причине того, что оно становится избыточным после понижения порядка дифференциального уравнения по переменной X' с двух до единицы. Граничное условие на входе в расчетную область использовалось в неизменном виде (2.34). Вместо граничных условий II рода (2.33), в рамках которых нельзя получить нетривиальное решение задачи методом разделения переменных, использовали граничные условия I рода: $C'|_{Z'=0} = C'|_{Z'=1} = 0$. Физически выбор таких граничных условий может приводить к более интенсивному оседанию частиц аэрозоля как на почве, так и на кровле горной выработки.

Формула (2.39) учитывает оседание пыли за счет турбулентной диффузии в вертикальном направлении горной выработки, но не учитывает эффекты коагуляции частиц аэрозоля и конденсации влаги на них. Предполагается, что данная формула будет хорошо работать в случае, когда концентрация соляного аэрозоля в горной выработке мала (в этом случае коагуляция частиц будет протекать медленно), а относительная влажность воздуха будет ниже критической величины (отсутствие конденсации).



Рисунок 2.11 – Изменение средней концентрации аэрозоля по длине горной выработки: сплошная линия – аналитическая модель, точки – данные натурного эксперимента

На рис. 2.11 представлен сравнительный анализ результатов формулы (2.39) и результатов экспериментальных измерений массовой концентрации пыли.

Из рисунка видно, что оседание пыли по аналитической формуле (2.39) в целом совпадает с результатами натурных замеров.

Формула (2.39) может быть усовершенствована на предмет учета процессов коагуляции частиц и конденсации на них влаги путем добавления эмпирических множителей, полученных в результате проведения многопараметрического численного моделирования и последующего поиска аппроксимирующих функций для полученных численных зависимостей.

В настоящей работе посредством метода наименьших квадратов найдено два эмпирических множителя для (39): F_C , позволяющий учесть оседание частиц аэрозоля вследствие их коагуляции, и F_{φ} , позволяющий учесть оседание частиц аэрозоля вследствие конденсации влаги на них:

$$\lambda = 0.17 \frac{\pi^2 D_T}{h^2 V_r} F_C F_{\varphi}, \qquad (2.40)$$

$$F_c = 1 + 0,0075 \left(h^2 C_0\right)^{0,67}, \tag{2.41}$$

$$F_{\varphi} = 1 + 0,0038 (h^2 \Delta \varphi)^{1,8}.$$
(2.42)

Здесь C_0 – начальная концентрация аэрозоля, мг/м³; $\Delta \varphi$ – разница между фактической относительной влажностью воздушного потока и критической влажностью, %.

Предполагается, что если фактическая относительная влажность воздушного потока меньше критической влажности, то $\Delta \varphi = 0$. В (2.34) дополнительно введен множитель 0,3 – для того, чтобы исключить слишком быстрое оседание частиц аэрозоля в модели (2.39), вызванное использованием в ней граничных условий I рода. Величина 0,17 определена в результате сопоставления аналитической модели (2.39) с расчетными данными на численной модели (2.27) – (2.36) в отсутствие процессов коагуляции и конденсации.

Помимо экспериментальных исследований процессов оседания пыли нами были проведены инструментальные замеры зависимости массовой концентрации соляного аэрозоля в забое от производительности комбайнового комплекса, позволяющие определить и математически описать источник пыления *F*.

2.3 Математическое описание генерирования пылевого аэрозоля при различных способах добычи калийных солей и определение источника пыления

Интенсивность образования пыли, т. е. количество образующегося пылевого аэрозоля в единицу времени, источником пыления, описывается в конвективно-диффузионном уравнении (2.3) функцией *F_i* (*x*, *t*).

При этом сама функция F_i определяется на единицу площади сечения S выработки – ветви ориентированного графа и зависит от характера источника пыления. В принципе, для каждого типа (вида) источника пыления надо определить свою функцию. Такая функция может быть распределенной по всей длине выработки, например, пыление магистрального конвейера, движение самоходного вагона с рудой, взметывание выли с почвы или стенок выработки, утечки запыленного воздуха из всасывающего трубопровода и т.п., а может быть сосредоточенной в одном локальном месте. Такое место можно отображать в вентиляционной сети как точечный «узел» сети, в котором действует источник.

Поскольку введение таких «узлов» сети только формально разбивает ветвь на «подветви», таких узлов можно ввести множество, тем самым описывая и распределенные источники пыления. Таким образом, задание F_i в узле сети одинаково пригодно для решения любых сетевых задач с любым характером выделения примеси.

В соответствии с общими законами физических процессов и их математических описаний можно задать в этих специально образованных узлах

— либо фиксированный поток воздуха q с определенной концентрацией пыли *C*, что дает для стационарных задач

$$F = qc, \,\mathrm{MF/c \times M^3}, \tag{2.43}$$

— либо определенную концентрацию пыли C, которую удобно обозначить через ΔC.

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

$$C^{-} = C^{+} + \Delta C, M\Gamma/M^{3},$$
 (2.43)

Такой способ задания функции пыления оказывается значительно удобней, особенно для описания нестационарных процессов, или решения стационарных процессов итерационным способом. На каждом шаге по времени мы можем пересчитывать концентрации с учетом и приноса пыли потоком и с учетом пыления.

Для решения конкретных задач нужно знать значение «прироста пыли» ΔC , являющегося с физической точки зрения концентрацией в месте задания функции F_i .

Заметим, что ΔC инструментально относительно несложно определить в натурном эксперименте. Определим ΔC для двух основных источников пыления – тупиковых комбайновых проходческих забоев и для лав столбовой (длинными очистными забоями) системы разработки.

Существует эмпирическая формула для определения средней запыленности воздуха (мг/м³) на рабочем месте машиниста комбайна для тупиковых выработок, проходимых комбайном, полученная в работах классиков рудничной аэрологии [94]:

$$\bar{\Delta C} = \Delta \bar{C}_{30\%} \exp\left(0.3 - \frac{\varphi}{100}\right). \tag{2.45}$$

$$\Delta \bar{C}_{30\%} = 250\bar{J},\tag{2.46}$$

Здесь $\Delta \bar{C}$ – прирост концентрации пыли при произвольной относительной влажности воздуха, мг/м³; \bar{J} – средняя производительность комбайна, т/мин; $\Delta \bar{C}_{30\%}$ – прирост концентрации пыли при относительной влажности воздуха 30%; φ – 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 (2.45) и (2.46), (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 $\Delta \bar{C}$ в уравнениях (2.45) и (2.46) нами были проведены

специальные исследования зависимости массовой концентрации пыли от производительности комбайна комплекса в длинном очистном забое.

Экспериментальные исследования проводились на 1 РУ и 3 РУ ОАО «Беларуськалий». Замеры производились при помощи прибора контроля запыленности воздуха ПКА-01. Схема проведения замеров представлена на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Расположение точки замера

Как видно из рисунка 2.12 место замера располагалось таким образом, чтобы вся пыль, образующаяся при отбойке руды, проходила через точку замера. Одновременно фиксировались значения температуры, относительной влажности воздуха, количества воздуха, поступающего на проветривание лавы. Мощность вынимаемого пласта составляла 2,08 м. Замеры массовой концентрации пыли производились при различных производительностях комбайна: 3,34 т/мин, 6,68, т/мин, 10,3 т/мин.

На рисунке 2.13 графически представлена зависимость массовой концентрации пыли, образующейся при добыче руды длинными очистными забоями (при относительной влажности воздуха 40 %).



Рисунок 2.13 – Зависимость массовой концентрации пыли, образующейся при добыче руды длинными очистными забоями, от производительности комбайна: а) лава 3–7в 3 РУ, лава 1–3, б) лава 1–4 1 РУ, в) лава 1–3 1 РУ

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

$$\Delta \bar{C}_{30\%} = 196J + 627, \, \mathrm{Mr/M^3} \tag{2.47}$$

$$\Delta \bar{C} = \Delta \bar{C}_{30\%} \exp\left(0.3 - \frac{\varphi}{100}\right). \text{ MG/M}^3.$$
 (2.48)

Значения, полученные по данной формуле, могут быть использованы в качестве исходных данных для решения сетевой задачи, когда рассматривается пыление в лаве.

2.4 Программная реализация численного решения сетевой задачи движения соляных аэрозольных частиц в системе горных выработок

Известно, что при расчете распределения вредных примесей (газа, пыли) в одномерной постановке механизм продольной диффузии можно учесть через понятие коэффициента дисперсии [205, 78]. Исследование влияния аварийного выделения вредных примесей на количество поступающего воздуха и устойчивость движения воздуха описано в работах [214, 213], но в них не рассматривается распределение примеси во всех выработках рудника.

Упрощенная модель переноса вредных примесей, используемая для расчета стационарного газораспределения в моделях вентиляционной сети рудников, приведена в работе [19], но в данной модели не учитывается механизм диффузии, а для расчета применяется модель идеального вытеснения. Подобный подход правомерен при соблюдении двух условий: 1) Скорость движения воздуха значительно больше, чем величина турбулентной диффузии, что позволяет пренебречь диффузионным переносом примеси в продольном направлении. 2) Длина выработок значительно больше их поперечного размера, что является условием корректности одномерной постановки задачи, в рамках которой и работает модель идеального вытеснения.

Алгоритм решения сетевой задачи распространения пыли в вентиляционной сети реализован в аналитическом комплексе «Аэросеть», что позволяет оперативно рассчитывать перенос примесей в вентиляционной сетях произвольной топологии [70].

В рамках алгоритма предполагается, что распределение расходов в вентиляционной сети известно. Далее задается фиксированный шаг по времени Δt , определяющий точность численного расчета. Исходя из известного шага по времени для каждой из горных выработок (или ветвей вентиляционного графа) определяется свой шаг по пространству:

$$\Delta L_i = v_i \Delta T_i, \tag{2.49}$$

где ΔL_i – элементарный отрезок выработки (ветви), м; v_i – скорость движения воздуха, м/с.

Такой выбор шага по пространству позволяет упростить классическую схему «вверх по потоку» для одномерного уравнения адвекции [80] и привести ее к виду:

$$C_{i,j}(t + \Delta t) = C_{i,j}(t) + \frac{W_{i,j}(t)}{Q_i},$$
(2.50)

где символом C обозначена объемная концентрация пыли, M^3/M^3 ; W(t) – источник вредных примесей, M^3/c ; Q – расход воздуха, M^3/c ; t – время, c; индекс i нумерует ветви, индекс j нумерует узлы внутри рассматриваемой ветви.

Уравнение (2.50) применимо для всех узлов ветви, кроме начального (j=1), для которого концентрация рассчитывается из граничного условия – условия перемешивания потоков загрязненного воздуха, входящих в узел графа вентиляционной сети, являющегося инцидентным и начальным для рассматриваемой ветви. Принимается, что при входе в рассматриваемую ветвь концентрация вредной примеси усредняется соразмерно расходам входящих потоков воздуха:

$$C_{i,1}(t + \Delta T) = \frac{\sum_{e=1, e \neq i}^{n} C_{em}(t) Q_e}{\sum_{e=1, e \neq i}^{n} Q_e},$$
(2.51)

где e – номер инцидентной узлу ветви, из которой воздушный поток поступает в узел; n – общее количество ветвей, из которых воздушный поток поступает в узел, для которого записано условие (2.51); m – номер последнего узла в конечно-разностей сетке ветви с номером e, Q_e – расход воздуха в ветви с номером e.

Если начальный узел ветви является атмосферным, то концентрация вредных примесей в данном узле задается равной нулю: *C*_{*il*} = 0.

Для программной реализации используется модифицированный метод последовательных приближений, позволяющий улучшить сходимость численных расчетов.

Структура исходных данных, необходимых для расчёта распространения вредных примесей, имеет следующий вид:

- Топология модели вентиляционной сети.
- Длины $L_i(M)$ и сечения $S_i(M^2)$ всех выработок.
- Статусы всех узлов (подземный или наземный).
- Расходы воздуха Q_i (м³/с) во всех выработках, полученные в результате предварительного расчёта воздухораспределения в сети.
- Источники выделения (+) или поглощения (-) вредной примеси W_i (м³/с) в каждой из выработок (предполагаются находящимися в центре каждой из выработок).

- Интервалы времени действия каждого источника выделения или поглощения вредной примеси (мин).
- Суммарный промежуток времени t (с), в течение которого наблюдается (рассчитывается) распространение вредной примеси по сети.
- Шаг по времени $\Delta t(c)$, определяющий точность расчёта.

После внесения необходимых исходных данных перед началом расчёта распространения вредной примеси по ветвям графа вентиляционной сети в сети производятся подготовительные действия.

- 1) В каждой ветви рассчитывается скорость движения воздуха $v_i(m/c)$ исходя из рассчитанных ранее расходов воздуха: $v_i = \frac{Q_i}{s_i}$.
- 2) Для каждой ветви выделяется элементарный отрезок $\Delta L_i = v_i \Delta t$, который проходит элемент воздуха за счёт конвекции в этой ветви за время Δt [213].
- 3) Производится корректировка длин всех выработок на предмет содержания в них целого числа ΔL_i , которая проводится округлением в большую сторону, так как в ветви должен содержаться хотя бы один элементарный отрезок. Таким образом, число элементарных отрезков в ветви $n_i = 1 + int\left(\frac{L_i}{\Delta L_i}\right)$, а новые, скорректированные длины ветвей $L'_i = n_i \Delta L_i$ (int(x) целая часть x). Очевидно, что чем меньше Δt , тем меньше скорректированные длины будут отличаться от реальных. После проведения процедуры корректировки длин расчёт распространения вредной примеси по ветвям сети производится итерационно по времени, с шагом Δt .

Описанная выше схема (2.49) - (2.51) была модифицирована нами с целью учета диффузионного слагаемого. Наиболее реалистичной, по нашему мнению, является модификация схемы (2.49) - (2.51), использующая метод расщепления по физическим процессам [19]. В этом случае на каждой временной итерации алгоритм распределения вредных примесей выполняет на внутренних узлах каждой ветви № *i* два шага:

Шаг 1. Расчет конвективного переноса примесей с учетом источников выделения этих примесей в соответствии со схемой (2.49) -(2.51) на узлах $j = 2, ..., n_i$.

$$C_{i,j}^* = (1 - \Delta t \lambda) C_{i,j-1}(t) + \frac{W_{i,j}(t)}{Q_i},$$
(2.52)

где $C_{i,j}^*$ – промежуточные узловые значения концентрации вредных примесей, м³/м³; λ – коэффициент интенсивности осаждения вредной примеси на стенки горной выработки, с⁻¹.

Также на этом шаге по формулам (2.50) - (2.51) рассчитываются промежуточные значения на входных узлах ветвей:

Для внутреннего узла:

$$C_{i,1}^{*} = \frac{\sum_{e=1, e \neq i}^{n} C_{em}(t) Q_{e}}{\sum_{e=1, e \neq i}^{n} Q_{e}}.$$
(2.53)

Для атмосферного узла:

$$C_{i,1}^* = 0. (2.54)$$

Шаг 2. Расчет диффузионного переноса вредных примесей на внутренних узлах *j* = 2, ..., *n_i* – 1 согласно схеме ВВЦП (верхняя по времени и центральная по пространству):

$$C_{i,j}(t + \Delta t) = C_{i,j}^* + s_i \Big(C_{i,j+1}^* - 2C_{i,j}^* + C_{i,j-1}^* \Big),$$
(2.55)

$$s_i = \max\left(\frac{1}{2}; D_i \frac{\Delta t}{\Delta L_i^2}\right),$$
 (2.56)

где D_i – коэффициент продольной дисперсии (диффузии), м²/с.

Дополнительные граничные условия для шага 2 имеют вид:

$$C_{i,1}(t + \Delta t) = C_{i,1}^*, \qquad C_{i,n_i}(t + \Delta t) = C_{i,n_i}^*.$$
 (2.57)

В результате итерационного расчета уравнений (2.52) -(2.57) определяется распределение вредных примесей в вентиляционной сети рудника с учетом процесса продольной диффузии.

На рисунке 1.14 представлен пример расчета распределения пыли от источника пыления.



Рисунок 2.14 – Пример расчета распределения пыли от источника пыления

2.5 Выводы

- Разработана математическая сетевая модель динамики частиц соляного аэрозоля в горной выработке, учитывающая конвективно-диффузионный перенос частиц вместе с воздушным потоком.
- На основе экспериментальных исследований, оценивающих характер оседания пыли по длине горной выработки выведена аналитическая формула, описывающая процесс с помощью коэффициента осаждения λ.
- Определены эмпирические множители коэффициента осаждения, позволяющие учесть как оседание частиц аэрозоля вследствие их коагуляции, так и, оседание частиц аэрозоля вследствие конденсации влаги на них.
- 4. Определены значения истока пыления *F_i* для источников пыления тупиковых комбайновых выработок и протяженных забоев (лав).
- 5. Разработан численный метод решения параметризованной математической модели конвективно-диффузионного массопереноса, реализованный в качестве дополнительного модуля в аналитическом комплексе «Аэросеть», позволяющем прогнозировать распространение пыли от источника пыления в вентиляционной сети.

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ТУПИКОВОЙ КОМБАЙНОВОЙ ВЫРАБОТКИ С УЧЕТОМ РАЗМЕЩЁННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

3.1 Взаимосвязь организации ведения горных работ и физических механизмов технических способов проветривания тупиковых горных выработок

Тупиковые горные выработки являются, с одной стороны, неотъемлемой частью горных работ, а с другой стороны, представляют собой для проветривания гораздо более сложный случай, чем проветривание сквозных выработок, поскольку в них требуется организовать два потока воздуха – «прямой и «обратный».

Согласно правилам безопасности [157] в любых тупиковых забоях длиной более 10 м необходимо осуществлять принудительное проветривание с помощью вентилятора местного проветривания (ВМП), расположенного на сквозной воздушной струе, и вентиляционного трубопровода, проложенного от ВМП до забоя с отставанием не более 10 м. Тем самым однозначно предписывается применять исключительно нагнетательный способ проветривания, что, как показывает практика, не оптимально для комбайновой выемки, характеризующейся интенсивным пылевыделением и высокими скоростями подвигания забоя, характерными, например, для калийных рудников. Такие скорости проходки делают вспомогательные операции ручного труда по наращиванию нагнетательного трубопровода трудоемкими и снижающими производительность комбайнового комплекса.

Вместе с тем практика давно показала, что на начальном этапе проходки тупиковой выработки возможно использование сил плавучести и турбулентной диффузии [21, 22, 49, 50]. Это же возможно при больших сечениях тупиковых выработок [91].

Известно, что традиционно выделяют два основных способа принудительного проветривания тупикового забоя: нагнетательный и всасывающий [62].

Характерные особенности буровзрывного способа проходки (сила взрывной волны, разлет кусков руды, повреждающих оборудование, уходка груди забоя при каждом «отпале», образование «облака» горячих токсичных отпалочных газов, захватываемых отбитой рудой, относительная технологическая простота доставки свежего воздуха по мягкому трубопроводу и значительная длина деятельной струи) при относительно низких скоростях подвигания забоя вызвали доминирование нагнетательного способа проветривания на шахтах и рудниках в эпоху доминирования взрывной отбойки.

Стремление к повышению производительности труда потребовало, чтобы проветривание после взрывных работ не тормозило весь процесс проходки. Если время

85

такого проветривания укладывалось в межсменный перерыв, то это было приемлемо, а если нет – то необходимо было что-то менять в организации проветривания. Проблемы при применении нагнетательного способа проветривании в первую очередь возникали в длинных (порядка километра) разведочных или подготовительных выработках, когда относительно быстро вытесненные из забоя «отпалочные» газы длительное время двигались по выработке, препятствуя доступу в нее людей [62, 137].

В этих условиях более выгодным становилось применение всасывающего способа проветривания с жесткими трубами, особенно если темпы проходки были низки, а длина выработки значительна. Однако проветривание самого забоя шло медленно, в нем образовывались застойные зоны, которые представляли собой потенциальную опасность.

Лучшие результаты дало применение комбинированного способа проветривания, когда сам забой проветривается по схеме нагнетательного проветривания деятельной струей воздуха, а затем вытесненные из забоя примеси подхватываются и удаляются всасывающим способом [62]. При таком способе проветривания тупиковая выработка в целом проветривается по схеме всасывающего проветривания, а нагнетательный способ проветривания самого забоя выступает скорее как средство турбулизации объема загрязненного воздуха у груди забоя, вытесняя его своей струей (чистой или грязной) к всасывающему трубопроводу. Удаление местонахождения последнего от груди забоя делает (при буровзрывном способе отбойки руды) технологически осуществимым установку ВМП в тупиковой выработке и применение мягких труб.

Смена технологии проходки с буровзрывной на комбайновую [79] настолько существенно меняет характер загрязнения воздуха и характер самого проветривания, что ставит вопрос о научном обосновании выбора способа проветривания. Такой выбор зависит от многих причин (в том числе и чисто юридического характера), но с научной точки зрения - зависит от физических механизмов распространения примесей в рудничной атмосфере тупикового комбайнового забоя. Физические механизмы, в свою очередь, описываются математическими моделями, дающими понимание, как следует организовывать эффективное проветривание, какой способ применить.

Именно такое научное обоснование способа проветривания тупикового комбайнового проходческо-очистного забоя на калийных рудниках произведено ниже.

3.2 Содержательная постановка проблемы научно-обоснованного выбора способа проветривания тупиковой комбайновой выработки

Как уже сказано выше, проходка выработок тупиковым забоем представляет сложный случай ведения горных работ с позиции организации эффективного

проветривания, поскольку тупиковая выработка имеет только один открытый для воздушных потоков конец — свое устье [156, 182]. Понимание происходящих при этом физических процессов и использование инструментов их численного моделирования позволяет детально (и безопасно) исследовать даже плохо различимые в запыленном забое структуры движения воздуха, генерации и удаления пыли, что является особенно актуальным для научно обоснованного выбора способа проветривания и повышения эффективности использования свежего воздуха.

Широко применяемая на калийных рудниках России камерная система разработки предусматривает использование механизированных комбайновых комплексов, в состав которого входят проходческо-очистной комбайн, бункер-перегружатель и шахтный самоходный вагон.

На сегодняшний день наибольшее применение нашли проходческо-очистные комбайны типа «Урал» (Урал-10КС, Урал-20КС, Урал-20Р и др.), которые оснащены закрытыми щитом комбинированными планетарно-дисковыми исполнительными органами. В рамках данной работы, численное моделирование процесса вентиляции в тупиковой выработке проводилось для случая осуществления разработки с помощью проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» (рис.3.1).

Комбайновый комплекс, оставляя слева и справа, сверху и снизу минимально возможные зазоры с горным массивом, под действием основных потоков воздуха, поступающих в горную выработку и в забой, с учетом работы вентилятора - пылеотсоса и крыльчаток охлаждения электродвигателей формирует определенные направления потоков воздуха в зависимости от способа проветривания. Напомним, что на сегодняшний день Правила безопасности предполагают использование исключительно нагнетательного способа проветривания, причем отставание конца трубопровода не должно превышать 10 м от рабочего места машиниста комбайна.

Основными источниками 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-перегружатель.

В меньшей степени образование пыли происходит при перегрузке руды из бункераперегружателя в самоходной вагон, а также при движении вагона по выработке (играющего роль своеобразного поршня) при сдувании пыли с поверхности руды и взметывании ранее осевшей пыли с поверхности выработки, особенно с почвы.

87





В настоящей работе осуществлена разработка численной математической модели, позволяющей производить расчеты проветривания, как при нагнетательном, так и при всасывающем способах проветривания. Первым этапом такого моделирования является определение геометрической модели свободного воздушного пространства (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Геометрия расчетной области: (а) цветом выделены двигатели, кабина машиниста комбайна; (б) цветом показаны поверхности, на которых генерируется пыль

Заметим, что первоначальная попытка стопроцентной детализации геометрии оборудования привела к тому, что даже современные высокопроизводительные компьютеры не справлялись с задачей расчета. В связи с этим геометрия комбайна и бункера перегружателя была упрощена, но сохранила все важнейшие для процессов проветривания особенности, достаточные для поставленных задач. Подчеркнем, что в геометрии расчетной области были учтены все элементы, способные оказать значимое влияние на аэродинамические процессы.

В первую очередь в модели учтено расположение многочисленных электродвигателей комбайна, и осуществлен учет их температурного и механического воздействия на атмосферу рабочей зоны.

Такое воздействие, во-первых, происходит из-за сил плавучести, возникающих изза нагрева работающих двигателей (как показывает практика, температура корпуса двигателя может находиться в диапазоне от 30 до 60 0 C).

Другим существенным воздействием являются движения воздуха из-за воздушного охлаждения электродвигателей. Крыльчатки двигателей, интенсивно обдувая их корпус, вносят существенный вклад в структуру и турбулентность воздушных потоков. На рисунке 3.3. представлена упрощённая схема расположения приводов комбайна с указанием направления обдува двигателей.



Рисунок 3.3 – Направление воздушных потоков, создаваемых двигателями

Подчеркнем, что такая постановка задачи осуществлена в работе впервые и позволяет в содержательной постановке при разработке модели проветривания тупиковой горной выработки, проходимой комбайновым комплексом, учесть все реально действующие на практике особенности движения воздуха в забое.

3.3 Обоснование выбора математической модели турбулентного тепломассопереноса при проветривании тупиковой комбайновой выработки

Моделирование процессов проветривания в тупиковой комбайновой проходческоочистной горной выработке и определяемой ими динамики пылевого аэрозоля в рудничной атмосфере проводили с помощью коммерческого вычислительного пакета Ansys Fluent, основанного на методе конечных объемов.

Для описания пылевых аэрозолей в этом пакете доступны несколько разновидностей многофазных моделей, реализующих как Эйлеров (континуальный) - Euler-Euler, таки и Лагранжев (траекторный) - Euler-Lagrange подходы к описанию аэродисперсной среды.

В рамках настоящего исследования нами было выбрано и проведено численное моделирование с использованием континуального подхода к описанию движения аэродисперсной среды в турбулентном режиме движения с помощью осредненных (по Рейнольдсу) скоростей, давления, температуры, концентрации отдельных газов и самой пыли.

Для описания турбулентности использовали гипотезу Буссинеска о скалярной турбулентной вязкости, рассчитываемой с помощью энергии турбулентных пульсаций и скорости ее вязкого затухания, определяемых в свою очередь из уравнений движения.

Заметим, что с точки зрения вычислительных ресурсов, модель турбулентности "Spalart-Allmaras" является самой экономичной, т. к. она использует одно дополнительное уравнение переноса турбулентной вязкости. Однако, вследствие достаточно сложной геометрии расчетной области и интенсивных потоков воздуха (особенно при нагнетательном способе проветривания) высока вероятность образования отрывных потоков, для которых модель "Spalart-Allmaras" не рекомендуется к применению. Поэтому эта модель турбулентности была исключена нами из возможных к применению и не применялась для моделирования проветривания тупиковой комбайновой выработки.

Стандартная k-є модель (где k – энергия турбулентных пульсаций, є – скорость вязкой диссипации турбулентных пульсаций скорости) требует несколько больших вычислительных ресурсов по сравнению с моделью "Spalart-Allmaras", т. к. описывается двумя дополнительными уравнениями переноса.

В частности, так называемая "Realizable" k-є модель требует несколько больших вычислительных усилий по сравнению со стандартной k-є моделью, из-за дополнительных условий и функций в основных уравнениях, а также из-за большей степени нелинейности. Вычисления с помощью этой модели занимают на 10–15% времени центрального процессора больше, чем в случае стандартной k-є модели.

90

Заметим, что подобно k-є моделям, k-ю модели также являются двухпараметрическими и требуют аналогичных вычислительных ресурсов.

По сравнению с k-є и k-ю моделями турбулентности более точное описание самой турбулентности в рамках "RSM" моделирования требует дополнительной памяти и времени центрального процессора из-за увеличения числа уравнений переноса Рейнольдсовых напряжений. В среднем "RSM" моделям требуется на 50–60% времени CPU больше, чем при расчете двухпараметрических моделей турбулентности, и на 15-20% больше оперативной памяти. Кроме того, "RSM" модель требует значительно большего количества итераций по сравнению с двухпараметрическими моделями, т. к. в ней заложена ярко выраженная взаимосвязь между Рейнольдсовыми напряжениями и осредненным потоком.

Поскольку целью расчетов в рудничной вентиляции является не исследование тонкой структуры турбулентности, а расчет основной структуры воздушных потоков, определяющих характер проветривания, то применение модели "RSM" является нецелесообразным и эта модель применялась при моделировании.

Заметим, что временных затрат на итерационный процесс решения стационарных задач, выбор модели турбулентности может повлиять на сходимость численного решения. Проведенные тестовые расчеты с использованием k-є и k-ю моделей турбулентности показали, что наилучшая сходимость решения наблюдается при использовании k-є "Realizable" модели. Вследствие этого, данная модель и была выбрана для проведения моделирования процессов проветривания в тупиковой комбайновой выработке в наших исследованиях.

В соответствии с моделью k-є «Realizable" эволюция турбулентной кинетической энергии и диссипации турбулентной энергии описываются уравнениями:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\nu_{j}\kappa)}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[\left(\mu_{m} + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\kappa}} \right) \frac{\partial\kappa}{\partial x_{i}} \right] + G_{k} + G_{b} - \rho\varepsilon,$$
(3.1)

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\nu_{j}\varepsilon)}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[\left(\mu_{m} + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{i}} \right] + \rho C_{1} S\varepsilon - \rho C_{2} \frac{\varepsilon^{2}}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_{b}, \tag{3.2}$$

где *G_k* – генерация турбулентной кинетической энергии неоднородностями поля скорости, *G_b* – генерация турбулентной кинетической энергии, вычисляемая по формуле:

$$G_b = \beta \vec{g} \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial T}{\partial x_i}.$$
(3.3)

При этом уравнения Навье-Стокса и неразрывности запишутся в виде:

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(p + \frac{2}{3} \left(\rho k + (\mu + \mu_t) \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_i,$$
(3.4)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j)}{\partial x_j} = 0.$$
(3.5)

В уравнениях модели содержится несколько констант и использованы следующие обозначения:

$$C_{1} = max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right], \qquad \eta = S\frac{k}{\varepsilon}, \qquad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \qquad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} + \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} \right)$$
$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2} = 1.9, \quad \sigma_{k} = 1.0, \quad \sigma_{\varepsilon} = 1.2.$$

Турбулентная вязкость рассчитывается по формуле:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},\tag{3.6}$$

где в отличие от стандартной k-
є модели \mathcal{C}_{μ} не константа, а функция

$$C_{\mu} = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kS}{\varepsilon}}.$$
(3.7)

Здесь:
$$A_0 = 4.04$$
, $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$, $\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\sqrt{6} W \right)$, $W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{S}$.

Описанные выше уравнения необходимо дополнить уравнением состояния газа. В ходе моделирования динамика газа описывали в рамках модели идеального газа:

(3.8)

$$p = \frac{\rho}{M} RT,$$

где М– молярная масса воздуха, *R* – универсальная газовая постоянная.

Поле средней температуры рассчитывалось с использованием стандартного уравнения теплопереноса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \left(\vec{u}(\rho E + p)\right) = \nabla \cdot \left(K_{eff}\nabla T\right),\tag{3.9}$$

где

$$E = c_p T - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}.$$
 (3.10)

Коэффициент эффективной теплопроводности *K_{eff}* равен сумме теплопроводности газа и турбулентной теплопроводности:

$$K_{eff} = k + k_t = k + \frac{c_p \mu_t}{\Pr_t}, \qquad \Pr_t = 0.85.$$
 (3.11)

Практика давно уже показала, что точность численного моделирования турбулентных течений существенно зависит от корректного описания влияния твердых стенок на турбулентное движение воздуха. Граничные условия на твердой стенке должны учитывать влияние вязкости на малых расстояниях от стенки, приводящее к появлению тонкого ламинарного слоя вблизи стенки. При этом во внешней части пристеночной области турбулентность быстро увеличивается за счет генерирования кинетической энергии турбулентности из-за больших градиентов средней скорости.

Существует два подхода к моделированию турбулентного потока вблизи стенки:

---- с использованием специальных пристеночных функций;

-с использованием т.н. моделей с низким числом Рейнольдса.

Использование пристеночных функций требует, чтобы центр ячейки первой точки сетки лежал в логарифмическом слое, что приводит к чрезмерному измельчению ячеек, а для решения задачи с использованием модели низким Re также требуется высокое разрешение сетки вблизи границы. Оба подхода приводят к значительным погрешностям, если используются за пределами диапазона их действия. При этом пристеночное число Re (параметр у+) в случае сложной геометрии задачи невозможно точно вычислить перед решением задачи.

Чтобы избежать таких недостатков, мы использовали пристеночную модель Menter-Lechner [118], реализующую новый подход к моделированию граничных условий на твердых стенках. Основная идея этого подхода состоит в том, чтобы добавить в уравнение переноса кинетической энергии турбулентности источник S_{wall} , который будет учитывать пристеночные эффекты.

В результате уравнение для турбулентной кинетической энергии имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \kappa)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon + S_{wall}.$$
(3.12)

Дополнительный исходный член S_{wall} не равен нулю только в вязком подслое вблизи твердых стенок. Он необходим для корректного учета эффектов, наблюдаемых вблизи стенки, где характерные числа Рейнольдса достаточно низки. В логарифмической области и в ядре течений он автоматически становится нулевым. [Точная формулировка этого слагаемого на данный момент является частной собственностью и поэтому здесь не приводится]. Кроме стандартных граничных условий на твердых границах расчетной области использовались и специальные условия.

В частности, на внутренних поверхностях двигателей горнопроходческого оборудования комбайна ставилось граничное условие на касательную компоненту средней скорости. В большинстве расчетов касательная компонента скорости была равна 5 м/с. Это условие моделирует прокачку воздуха через двигатели при их работе.

На свободной границе выхода вентиляционных потоков из расчетной области (и забоя) ставилось граничное условие на скорость воздуха, которая при нагнетательном способе проветривания положительна, при всасывающем – отрицательна.

На границе, отсекающей рассматриваемый (расчетный) участок воздушного пространства горной выработки от остальной шахты, ставилось граничное условие на статическое давление.

Температура входящего в расчетную область воздуха полагалась равной 283 К.

Температура твердых стенок горного массива полагалась равной 283 К. При этом температура внутренних поверхностей двигателей горнопроходческого комбайна была экспериментально определена равной 323 К.

Вследствие этого следует ожидать наличия интенсивных конвективных течений вблизи двигателей. Стенки комбайна могут в значительной мере нагреваться в ходе его работы, поэтому на данных границах ставилось граничное условие отсутствия потока тепла.

Вследствие высоких скоростей движения воздуха в тупиковой выработке и сравнительно небольших размеров рассматриваемого расчетного участка выработки при описании динамики пыли можно пренебречь процессами гравитационного оседания и коагуляции частичек пыли.

Проведенные оценки показывают, что характерные времена гравитационного оседания и коагуляции значительно выше характерного времени нахождения элемента воздушной среды в рассматриваемом (расчетном) участке до момента попадания его в общую систему проветривания горных выработок или выдувания за пределы рассматриваемой области.

Вследствие этого при моделировании динамики пылевого аэрозоля в тупиковой горной выработке можно пренебречь гравитационным оседанием и коагуляций аэрозоля. В этом случае динамика пыли может быть описана на основе простой модели пассивной примеси.

Эволюция примеси описывается классическим уравнением массопереноса

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \boldsymbol{v} \cdot \nabla C = \nabla ((D + D_t) \nabla C), \qquad (3.13)$$

где *С* – безразмерная концентрация примеси, *D* – коэффициент диффузии, подбираемый на основании известных экспериментальных данных, *D*_t – коэффициент турбулентной диффузии.

Известно, что процесс пылеобразования происходит преимущественно вблизи щита комбайна и в верхней части бункера-перегружателя (или самоходного вагона), следующего за комбайном. В этой связи в предлагаемой модели учитываются два поверхностных источника пыли. Первый находится на поверхности щита комбайна, второй – на верхней поверхности бункера-перегружателя (самоходного вагона).

На указанных поверхностях постоянного пыления ставили граничное условие:

$$C = 1.$$
 (3.14)

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

$$C = 0. \tag{3.15}$$

На твердых поверхностях комбайна ставилось граничное условие непротекания:

$$\frac{\partial C}{\partial \vec{n}} = 0, \tag{3.16}$$

где \vec{n} – вектор нормали к границе.

Последнее условие описывает ситуацию, когда поверхность является сильно загрязненной, и потоки газа вблизи поверхности также достаточно велики. При этом наблюдается отрыв частичек пыли от поверхности. Условие (3.16) соответствует случаю, когда процесс оседания пыли и процесс отрыва от стенки происходят с одинаковой интенсивностью и компенсируют друг друга.

Размерная концентрация пыли рассчитывалась по формуле:

$$C_p = C_0 + \frac{\Lambda}{\bar{c}}C, \qquad (3.17)$$

где C_0 – концентрация пыли в воздухе рудника вдали от источников загрязнения (фоновый уровень), \bar{C} – средняя безразмерная концентрация в исходящем потоке, рассчитываемая в ходе моделирования, Λ – параметр модели, имеющий смысл размерности концентрации пыли.

Описанная модель динамики примеси имеет два параметра: коэффициент диффузии *D*, и параметр Л. Значения данных параметров определяли на основе сравнения результатов численного моделирования и данных натурных измерений состояния воздуха в шахте. Для всех результатов, представленных в настоящей работе, данные параметры равны:

$$D = 5 \cdot 10^{-5}, \qquad \Lambda = 28. \tag{3.18}$$

Средняя безразмерная концентрация в ходе моделирования вычислялась по средней концентрации пыли на границе, через которую воздух выходит из расчетной области. При всасывающем способе проветривания это вентиляционная труба, при нагнетательном – условная «граница» расчетной области – открытое пространство протяжения горной выработки вне забоя.

При моделировании предполагалось, что концентрация примеси во входящем в расчетную область воздухе равна нулю.

Таким образом, пылевой аэрозоль мог образовываться только на запыленных поверхностях, на которых ставилось условие (3.14).

Расчетная область представляла собой тупиковую выработку длиной 50 метров, чего вполне достаточно для достоверного описания воздушных потоков в забое. Вертикальное сечение выработки показано на рисунке 3.3.

Численное моделирование проводилось для упрощённой модели комбайна, при создании которой учитывались все крупные элементы, влияющие на динамику воздуха и пыли (см. рис. 3.2).

Последующая еще большая детализация модели приводила к увеличению густоты сетки в геометрической прогрессии и к ухудшению сходимости расчетов из-за сложных сочленений отдельных деталей комбайна и тонких проточных областей между ними.

Границы расчетной области дискретизировали гексагональной сеткой. Затем генерировалась объемная сетка с учетом пограничного слоя вблизи всех твердых поверхностей. Объемная сетка состояла из многогранников (рис. 3.4). Выбор данного типа элемента обусловлен значительным снижением количества конечных объемов по сравнению с тетраэдрической сеткой., что позволяет ускорить сходимость вычислений и снизить объем требуемой для вычисления памяти. В частности, при нагнетательном способе проветривания размер расчётной сетки составлял 4.6 млн узлов. При этом количество конечных объемов составило 1.2 млн. шт.

96





Рисунок 3.3 – Поперечное сечение тупиковой выработки



Пространственная дискретизация уравнений осуществлялась методом MUSCL третьего порядка точности [208]. Для получения стационарного решения использовали метод псевдо-эволюционного решения. В ходе решения стационарной задачи проводились итерации по эффективному времени до момента достижения стационарного решения.

Моделирование работы двигателей проводилось с учетом потока воздуха, который прокачивается через них для охлаждения (рис. 3.5). Геометрия их была построена таким образом, что площадь входного и выходного отверстий равны.



Рисунок 3.5 – Вертикальное сечение двигателя и характерное векторное поле скорости движения газа, наблюдаемое в расчетах. Цветом показано поле температуры

Использование предлагаемой модели и инструментов расчёта для исследования динамики пылевоздушных потоков в пространстве тупиковой комбайновой выработки на

практике возможно лишь в том случае, если есть уверенность, что предложенная модель дает правдивые результаты, то есть необходима ее верификация с фактическими замерами, проведенными в реальных условиях.

Для верификации, предложенной выше модели, позволяющей оценить динамику пылевоздушных потоков в пространстве тупиковой горной выработки с учетом размещенного в ней оборудования, нами был проведен ряд натурных экспериментов в реальных условиях калийных рудников.

3.4 Экспериментальные исследования параметров пылевоздушных потоков в тупиковом комбайновом проходческо-очистном забое

Экспериментальные исследования свойств пылевоздушных потоков в тупиковом комбайновом забое проводились на одном из рудников ПАО «Уралкалий» в два этапа.

Первый этап был выполнен на руднике СКРУ-3 (на пласте АБ). На основании этих замеров впоследствии разрабатывалась модель.

Второй этап проводился позднее в условиях рудника СКРУ-1, он повторял условия первого этапа, однако состоял из большего количества измерений. В дальнейшем по нему оценивалась возможность разработанной модели показывать достоверные результаты.

Результаты экспериментальных исследований 1 этап.

Для исследования была выбрана очистная камера, длина камеры на момент начала замеров составляла 150 м, на момент окончания 157 м. Отбойка руды в камере осуществлялась добычным комбайновым комплексом в составе комбайна Урал 20Р, бункера-перегружателя и самоходного вагона. Оценивались три режима проветривания тупикового забоя.

1. Нагнетательный способ проветривания, отставание вентиляционного става от кабины машиниста комбайна 10 м, скорость воздуха, выходящего из вентиляционного става, 19,4 м/с, диаметр вентиляционного става 0,5 м.

2. Нагнетательный способ проветривания, отставание вентиляционного става от кабины машиниста комбайна 25 м, скорость воздуха, выходящего из вентиляционного става 20 м/с, диаметр вентиляционного става 0,5 м.

3. Всасывающий способ проветривания. В качестве источника тяги использован вентилятор пылеотсоса (на выхлоп вентилятора надет вентиляционный став, другой конец става выведен на выемочный штрек). Скорость воздуха на выходе из вентиляционного става 7,8 м/с, диаметр вентиляционного става 0,5 м.

98

При каждом режиме проветривания оценивались скорости и направления воздушных потоков в различных точках рабочей зоны, а также массовая концентрация аэрозоля.

В каждой точке производилась серия замеров (21 замер), затем вычислялось среднее арифметическое. Для замеров концентрации пыли использовался «Портативный прибор для измерения массовой концентрации аэрозольных частиц», дополнительно в каждой точке замерялась концентрация сероводорода (экспресс метод газоанализатор Dräger).

На рисунке 3.6 представлена схема расположения комбайнового комплекса с указанием мест точек замеров.



Рисунок 3.6 – Схема размещения оборудования и точек замеров в тупиковом комбайновом забое при нагнетательном способе проветривания.

Режим 1. Нагнетательный способ проветривания, отставание вентиляционного става от кабины машиниста комбайна - 10 м, скорость воздуха, выходящего из вентиляционного става - 19,4 м/с, диаметр вентиляционного става - 0,5 м.

Для оценки воздушных потоков режима №1 в тупиковой выработке при нагнетательном способе проветривания была произведена серия замеров скорости воздуха в сечениях 1–1 и 2–2 (рис. 3.6). На рисунках 3.7–3.8 представлены результаты замеров.



Рисунок 3.7 – Результаты замеров поля скоростей по сечению выработки (направление взгляда на забой). Направление движения воздуха в сторону

– от забоя.



Из рисунка 3.7. видно, что поле скоростей воздуха в сечении 1–1 не является однородным. Замерами зафиксированы две зоны воздушного пространства забоя с относительно слабым потоком воздуха, которые находятся в правой верхней и нижней четвертях (выделены на рисунке) сечения выработки. Скорость воздуха в этих зонах находится в диапазоне от 0,1 до 0,21 м/с.

На рисунке 3.8 представлены результаты замеров скорости воздуха в сечении 2–2. Замеры проводились с двух сторон от комбайнового комплекса в трех точках по высоте.

Еще один замер производился в 12 метрах от забоя горной выработки (сечение 2–2), плоскость замеров располагается на уровне пересыпа руды с комбайна в бункерперегружатель. Выяснено, что с левой стороны бункера-перегружателя (взгляд на забой) скорость воздуха существенно выше (от 1,65 до 4,8 м/с), что объясняется действием струи свежего воздуха из вентиляционного става, расположенного с этой стороны выработки.

Замерные точки 1,2,3 расположены на пути воздушной струи, выходящей из вентиляционного става. Струя воздуха движется вдоль левой стенки выработки, омывает призабойную часть, где насыщается пылевым аэрозолем, кроме того, на нее воздействуют потоки воздуха, создаваемые системами охлаждения двигателей, частично рассеивается и возвращается с правой стороны комбайна и бункера-перегружателя, образуя огромный вихрь, размером с забой.

За счет рассеивания струи в замерных точках 4,5,6 скорость воздуха оказывается ниже (от 1,33 до 1,62 м/с). Далее поток воздуха разделяется, часть проходит под стрелой бункера-перегружателя (это обусловлено тем, что вентиляционный став лежит на почве) и возвращается к кабине машиниста комбайна (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Расположение сечений замера скорости воздуха и направления потока воздуха при нагнетательном способе проветривания

Таким образом, при классических условиях нагнетательного способа проветривания зафиксирован вихреобразный поток воздуха, возвращающий часть загрязненной пылью пылевоздушной смеси обратно в зону работы (зону дыхания) машиниста комбайна.

Измерение концентрации пыли (в режиме 1)

Измерение массовой концентрации пыли производилось в трех плоскостях рабочей зоны (расположение плоскостей показано на рисунке 3.9) в трех режимах проветрвания.

Плоскость 3–3 проходит поперек горной выработки через кабину машиниста комбайна. В этой плоскости располагаются четыре замерные точки:

- точка № 1 – расположена с левой стороны комбайнового комплекса (взгляд на забой) на зоны дыхания машиниста комбайнового комплекса;

- точка № 1¹ – расположена под точкой № 1 в 20 см от почвы выработки;

- точка № 3 – расположена с правой стороны комбайнового комплекса (взгляд на забой) напротив точки № 1, на той же высоте;

- точка № 3¹ - расположена под точкой № 3 в 20 см от почвы выработки

На рисунке 3.10, представлены точки замеров концентрации пылевого аэрозоля в плоскости 3-3, 2-2 и 1-1.



Рисунок 3.10 – Расположение точек замера концентрации пыли в сечениях 1–1, 2–2, 3–3.

В таблице 3.1 представлены результаты замеров массовой концентрации пыли (средние значения) в замерных точках, расположенных в плоскости 3–3, а также, концентрация сероводорода в этих точках. ПДК сероводорода -7,04 ppm.

Таблица 3.1 – Результаты замеров массовой концентрации пыли (средние значения) в замерных точках, расположенных в плоскости 3–3,

Точка замера	Средняя концентрация	H_2S , ppm	Относительная
	пыли, мг/м ³		влажность воздуха, %
1	27,5	12,6	43
11	46,6	14,1	43
3	88,8	18,4	43
31	94,5	20	43

Плоскость 2–2 проходит поперек горной выработки через место пересыпа руды из комбайна в бункер-перегружатель. В данной плоскости расположены две замерные точки: - точка № 2 - расположена с левой стороны комбайнового комплекса (взгляд на забой) на уровне головы машиниста комбайнового комплекса; точка № 2¹ – расположена под точкой № 1 в 20 см от почвы выработки.

В таблице 3.2 представлены результаты замеров массовой концентрации пыли (средние значения) в замерных точках, расположенных в плоскости 2–2, а также, концентрация сероводорода в этих точках. ПДК сероводорода -7,04 ppm.

Таблица 3.2 – Результаты замеров массовой концентрации пыли (средние значения) в замерных точках, расположенных в плоскости 2–2

Точка замера	Средняя	H_2S , ppm	Относительная
	концентрация		влажность воздуха, %
	пыли, мг/м ³		
2	66,6	18,5	43
2^{1}	53,2	12	43

Плоскость 1–1 проходит поперек горной выработки в 10 м от бункера. В данной плоскости расположена одна замерная точка № 4, расположенная в центре.

Концентрация пыли в этом сечении при (при нагнетательном способе проветривания и отставании вентстава 10 м от кабины машиниста комбайна) составила 69 мг/м³ (среднее из 21 замера). Замер производился в центре выработки.

На рисунке 3.11 показаны значения концентрации пыли в различных областях рабочей зоны.



Рисунок 3.11 – Схема движения воздушных потоков и массовая концентрация пыли в рабочей зоне. Комбайн (1), бункер-перегружатель (2), самоходный вагон (3); места основного пылеобразования: отбойка руды в защитовом пространстве (4), пересып отбитой горной массы со стрелы комбайна в бункер-перегружатель (5), пересып горной массы из бункера-перегружателя в самоходный вагон (6); рабочих мест: машиниста-оператора комбайнового комплекса (7) и машиниста самоходного вагона (8), а также вентилятора пылеотсоса (9), существенно определяющего пылевую обстановку в забое.

Результаты замеров показывают наличие вихреобразных потоков воздуха в пространстве рабочей зоны, об этом свидетельствует тот, на первый взгляд, парадоксальный факт, что, хотя точка замера в сечении 2–2 (со стороны нагнетательного воздуховода) лежит в непосредственной близости от выхода воздуха из вентиляционного става (на пути потока свежего воздуха) массовая концентрация пыли в сечении 2–2 превышает концентрацию пыли у кабины машиниста комбайна.

Кроме того, анемометром удалось зафиксировать качественную картину присутствия вихреобразных потоков, которые частично возвращают запыленный воздух к рабочему месту машиниста комбайна.

Режим 2. Нагнетательный способ проветривания, отставание вентиляционного става от кабины машиниста комбайна - 25 м, скорость воздуха, выходящего из вентиляционного става - 20 м/с, диаметр вентиляционного става - 0,5 м.

Заменим, что режим 2 существенно отличается отставанием конца вентиляционного става (25 м вместо 10 м).

Замеры скорости воздуха массовой концентрации аэрозоля и концентрации сероводорода при отставании вентиляционного става от кабины машиниста комбайна 25 м проводились тех же точках, что и в режиме 1.

На рисунках 3.12–3.13 представлены результаты замеров скоростей воздуха в сечениях 1– 1 и 2–2. а в таблицу 3.3 свелены результаты замеров массовой концентрации пыли.





Рисунок 3.12 – Результаты замеров поля скоростей по сечению выработки (направление взгляда на забой). Направление движения воздуха в сторону от забоя



Таблица 3.3 – Результаты замеров массовой концентрации пыли

Точка замера	Средняя концентрация	H ₂ S, ppm	Относительная
	пыли, мг/м ³		влажность воздуха, %
1	57,3	12,4	
11	108,2	12,1	
2	52,8	12,4	
21	93,2	28,4	43
3	109,8	16,6	
31	108,2	30,0	
4	32,6	10,5	

*Расположение точек замера представлено на рисунке 3.10.

Полученные результаты показывают ухудшение пылевой и газовой обстановки в рабочей зоне при увеличении расстояния конца вентиляционного става о рабочего места

машиниста комбайна, когда все без исключения «микрозоны» забоя превращаются струей свежего воздуха в сплошной «пылевой туман». Эти результаты давно уже известны практикам, практически не имеют особой научной новизны, дополняя известное новыми фактами и цифрами, что позволяет повысить достоверность данных для верификации математических моделей.

На рисунке 3.14 показаны значения концентрации пыли в различных областях рабочей зоны при отставании вентиляционного става 25 м.



Рисунок 3.14 – Схема движения воздушных потоков и массовая концентрация пыли в рабочей зоне. Комбайн (1), бункер-перегружатель (2), самоходный вагон (3); места основного пылеобразования: отбойка руды в защитовом пространстве (4), пересып отбитой горной массы со стрелы комбайна в бункер-перегружатель (5), пересып горной массы из бункера-перегружателя в самоходный вагон (6); рабочих мест: машиниста-оператора комбайнового комплекса (7) и машиниста самоходного вагона (8), а также вентилятора пылеотсоса (9), существенно определяющего пылевую обстановку в забое.

Структура потоков, показанная на рисунке, четко показывает, что при увеличении расстояния вентиляционного става от забоя пыль, образующаяся в технологическом процессе, в большей степени концентрируется в рабочей зоне нахождения комбайна и многократно циркулирует там.

На рисунке 3.15 представлены результаты сравнения замеров массовой концентрации пыли в атмосфере рабочей зоны при двух режимах проветривания: нагнетательный с отставанием вентиляционного става 10 м от кабины машиниста комбайна; нагнетательный с отставанием вентиляционного става 25 м от кабины машиниста комбайна.



Рисунок 3.15 – Сравнение концентрации пыли в рабочей зоне при различных отставаниях вентиляционного става.

Режим существенно двух первых 3 отличался от тем, что вместо нагнетательного способа проветривания был реализован всасывающий способ проветривания. В качестве источника тяги использовали вентилятор пылеотсоса (на выхлоп вентилятора надевали вентиляционный став, другой конец става выводили через выемочный штрек в отработанную камеру). Скорость воздуха на выходе из вентиляционного става составляла 7,8 м/с (уменьшение подачи воздуха в забой примерно в 2,5 раза), диаметр вентиляционного става 0,5 м.

На рисунке 3.16 представлено расположение вентиляционного става, подсоединённого к вентилятору пылеотсоса и точек замера массовой концентрации пыли (расположение точек замера полностью совпадает с режимами № 1 и № 2 с использованием нагнетательного способа проветривания).



Рисунок 3.16 – Расположение вентиляционного става, подсоединённого к вентилятору пылеотсоса и точек замера движения воздуха и пылевой обстановки

На рисунке 3.17 представлены результаты замеров скоростей воздуха в сечении 2– 2. Замеры проведены с двух сторон бункера перегружателя в трех точках по высоте. При всасывающем способе проветривания с обеих сторон бункера-перегружателя воздух движется в сторону забоя (к «всасу» вентилятора пылеотсоса), унося с собой пыль. В данном конкретном случае вентилятор пылеотсоса был установлен по ряду производственных причин нестандартным образом, и его «всас» располагался между вентилятором и кабиной машиниста комбайна. При стандартной установке зона «всаса» распложена с правой стороны комбайна (взгляд на забой) между комбайном и стенкой выработки.



Рисунок 3.17 – Расположение точек замера скорости воздуха в сечении 2–2 (при всасывающем способе проветривания

В таблице 3.4 представлены результаты замеров концентрации пыли (средние значения), сероводорода (ПДК -7,04 ppm)

Точка замера	Средняя концентрация	H_2S , ppm	Относительная
	пыли, мг/м ³		влажность воздуха, %
1	99,5	19,4	
11	32,9	19,7	
2	54,0	15,5	
21	29,3	15,0	43
3	92,9	19,2	
31	46,7	18,6	
4	32,2	10,5	

|--|

Несмотря на то, что производительность вентилятора пылеотсоса обеспечивала значительно меньшую подачу воздуха в забой, массовая концентрация пыли в некоторых замерных точках (микрозонах) при всасывающем способе проветривания оказалдась существенно ниже, чем при нагнетательном способе проветривания с нормативным отставанием вентиляционного става 10 м.

На рисунке 3.18 представлено сравнение результатов замеров массовой концентрации пыли при первом и третьем режиме проветривания.



Рисунок 3.18 – Сравнение массовой концентрации пыли в различных точках рабочей зоны при нагнетательном способе проветривания (с отставанием вентиляционного става от забоя 10 м) и при всасывающем способе проветривания

Из приведенных на рисунке 3.18 диаграмм четко видно, что концентрация пыли при всасывающем способе проветривания выше в двух замерных точках: 1 (верхняя точка, рядом с кабиной машиниста комбайна) и 3 (верхняя точка, с правой стороны комбайна, взгляд на забой). Во всех остальных точках массовая концентрация пыли меньше при всасывающем способе проветривания. Еще раз подчеркнем, что производительность всасывающего вентилятора в момент проведения замеров была почти в 2,5 раза ниже, чем нагнетательного. Это говорит о перспективности данного способа проветривания в условиях интенсивного пылевыделения при условии изменения параметров всасывающего вентилятора до необходимого стандартного уровня.

Результаты экспериментальных исследований 2 этапа.

Как уже было сказано выше, условия экспериментальных замеров 2 этапа повторяли условия 1 этапа (замеры проводились при отставании вентиляционного става от кабины машиниста комбайна 10 м), при этом количество точек замера запыленности было увеличено в три с половиной раза. Замеры проводились в трех сечениях (рис. 3.19)


Рисунок 3.19 - Схема расположения замерных сечений

На рисунке 3.20. представлена схема расположения точек замера в сечениях выработки в условиях нагнетательного способа проветривания.



Рисунок 3.20 – Расположение и номера точек замера массовой концентрации пыли в сечениях выработки (нагнетательный способ проветривания)

В таблице 3.5 представлены средние значения массовой концентрации пыли (из 20 замеров в каждой точке).

T (<u>م</u>	D				v			
Габлица	<u> う</u>	Pesv	пьтаты	замерс	в масс	овои	концент	рании	пыпи
таотніца с		- • • · · ·	1010101	Janepe	D maee	ODOII	nonqen i	рации	110101111

Номер	Массовая	Относительная	Номер	Массовая	Относительная
замерной	концентрация	влажность	замерной	концентрация	влажность
точки	пыли, мг/м ³	воздуха	точки	пыли, мг/м ³	воздуха
1	97		14	74	
2	92	41	15	85	<i>A</i> 1
3	98	71	16	92	71
4	105		17	83	

Номер	Массовая	Относительная	Номер	Массовая	Относительная
замерной	концентрация	влажность	замерной	концентрация	влажность
точки	пыли, мг/м ³	воздуха	точки	пыли, мг/м ³	воздуха
5	88		18	100	
6	98		19	113	
7	102		20	98	
8	108		21	92	
9	115		22	91	
10	96		23	80	
11	96		24	88	
12	116		25	93	
13	109				

На рисунке 3.21. представлена схема расположения точек замера в сечениях выработки в условиях всасывающего способа проветривания.





В таблице 3.6 представлены средние значения массовой концентрации пыли (из 20 замеров в каждой точке).

	n				
1 ab $\pi u u a + b$	Ρουπι τοτι ι	DOMOD	MACCODON	VOILLEUTNALLI	пттпи
таолица 5.0 —		Samepub	Maccobon	копцептрации	IIDIJIII
1				· · ·	

Номер	Массовая	Относительная	Номер	Массовая	Относительная
замерной	концентрация	влажность	замерной	концентрация	влажность
точки	пыли, мг/м ³	воздуха	точки	пыли, мг/м ³	воздуха
26	85		39	74	
27	73	41	40	66	41
28	62		41	71	

Номер	Массовая	Относительная	Номер	Массовая	Относительная
замерной	концентрация	влажность	замерной	концентрация	влажность
точки	пыли, мг/м ³	воздуха	точки	пыли, мг/м ³	воздуха
29	63		42	68	
30	45		43	71	
31	95		44	52	
32	84		45	45	
33	80		46	44	
34	65		47	43	
35	45		48	43	
36	100		49	44	
37	96		50	41	
38	88]]

Результаты полученные на этом этапе выполнения исследований качественно совпадали с результатами первого этапа, но дали дополнительные данные для сравнения с результатами численного моделирования и послужили основой для верификации выбранной модели турбулентного движения аэродисперсной бинарной смеси.

3.5 Верификация численного моделирования проветривания тупикового комбайнового забоя

Используя инструменты, заложенные в программном пакете Ansys Fluent, в численной модели турбулентного проветривания была воспроизведена ситуация работы комбайна Урал 20Р с бункером-перегружателем БП-15 в двух режимах: 1 (нагнетательный способ проветривания, отставание вентиляционного става от кабины машиниста комбайна 10 м, скорость воздуха, выходящего из вентиляционного става, 19,4 м/с, диаметр вентиляционного става 0,5 м) и 3 (всасывающий способ проветривания, в качестве источника тяги использован вентилятор пылеотсоса (на выхлоп вентилятора надет вентиляционный став, другой конец става выведен из выработки, скорость воздуха на выходе из вентиляционного става 7,8 м/с, диаметр вентиляционного става 0,5 м)), описанный в разделе 2.4.

Необходимо заметить, что в геометрической модели расчетной области вентиляционный став показан с другой стороны комбайнового комплекса (при всасывающем способе проветривания). Это сделано для удобства восприятия, однако при этом место всаса, а также другие параметры полностью соответствуют результатам эксперимента. Сравнение результатов моделирования и натурных данных производилось по двум критериям - соответствие скоростей воздуха в конкретных точках и значений массовой концентрации соляного аэрозоля в замеренных точках реального забоя и по результатам численного моделирования.

На рисунке 3.22 показана геометрия расчетной области при нагнетательном способе проветривания, линиями показаны прямые, вдоль которых строились профили скорости.



Рисунок 3.22 – Геометрия расчетной области

Для получения достоверных результатов численного моделирования необходимо «настроить» разработанную многопараметрическую математическую модель физических процессов таким образом, чтобы результаты численного моделирования согласовывались с результатами экспериментальных исследований.

Ниже приведены данные результатов численного моделирования и натурного эксперимента с замеренными точками в сечениях, представленных на рисунке 3.20 (при нагнетательном и всасывающем способах проветривания).

Нагнетательный способ проветривания, режим 1.

На рисунке 3.23 представлены результаты сравнения концентрации пыли, получение в ходе численного эксперимента и натурных измерений. Каждая точка соответствует среднему значению из 20 замеров (в районе кабины машиниста). Среднее относительное отклонение от замеренных точек δ_{ср} составляет 12%





Как видно из рисунка 3.23 результаты численного моделирования довольно близко совпадают с результатами экспериментальных замеров, проведенных в сечении 3–3 (среднее относительное отклонение от замеренных точек δ_{ср} составляет 12 %).

На рисунке 3.24 представлена 3 D визуализация результатов численного эксперимента, моделирующего нагнетательный способ проветривания в тупиковой выработке с расположенным в ней комбайновым комплексом.



Рисунок 3.24 – Результаты численного эксперимента течения газа и концентрация пыли в выработке

Всасывающий способ проветривания

На рисунке 3.25 приведены данные сравнения результатов численного моделирования и экспериментальные замеры массовой концентрации пыли при всасывающем способе проветривания (в районе кабины машиниста).



Рисунок 3.25 – Сравнение результатов моделирования и данных измерений при нагнетательном способе проветривания

При выполнении численного эксперимента, повторяющего условия натурных экспериментов при реализации всасывающего способа проветривания, также удалось достичь хорошей сходимости результатов, описывающих профили скоростей воздушных потоков.

Замеренные в руднике концентрации пыли и полученные в результате численного моделирования значения имеют несущественное количественное расхождение, но на качественном уровне имеют достаточно хорошую сходимость. Такое расхождение можно объяснить относительной «грубостью» численного моделирования, заключающегося в невозможности учесть все нестационарности режима проветривания, связанные с работой крыльчаток, режущего органа, движения самоходного вагона и т.п. Однако главные результаты, играющие ведущую роль при организации проветривания, модель воспроизводит не только качественно, но и количественно. Учитывая, что модель настраивалась по результатам замеров, проведенных несколькими месяцами ранее, результаты повторного эксперимента показали превосходную сходимость.

На рисунке 3.26 представлена 3 D визуализация результатов численного эксперимента, моделирующего всасывающий способ проветривания в тупиковой выработке с расположенным в ней комбайновым комплексом.

114



Рисунок 3.26 – Результаты численного эксперимента течения газа и концентрация пыли в выработке (всасывающий способ проветривания)

Для проверки универсальности модели поведены экспериментальные исследования в условиях рудника Гремячинского ГОК (где фиксируются концентрации пыли совершенно других порядков). Инструментальные замеры проводились при нагнетательном проветривании. В дальнейшем было проведено сравнение замеренных величин с данными численного моделирования.

В рамках данного блока экспериментальных исследований методика проведения замеров подразумевала с собой наличие трех исследуемых сечений, которые представлены на рисунке 3.27:

- 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 3.27 – Расположение сечений, в которых производились замеры концентрации пыли и скорости воздуха

Полученные значения натурных исследований представлены в виде изображений с точечными концентрациями и расходами воздуха в горной выработке.

На рисунке 3.28 представлены результаты замеров произведенных в сечении 3-3.



Концентрация витающей пыли в воздухе

Полученные результаты свидетельствуют о том, что массовая концентрация пыли в сечении 3–3 с правой стороны комбайна выше значений в других местах забоя. Связано это с неравномерным распределением потоков воздуха. Анализ поля скоростей показывает и тот факт, что струя свежего воздуха, выходящая из вентиляционного трубопровода, не в полном объеме омывает поверхность забоя.

На рисунке 3.29 представлены результаты замеров произведенных в сечении 2-2.

Рисунок 3.28 – Результаты замеров концентраций пыли и локальных скоростей воздуха возле кабины машиниста комбайна (сечение 3–3)

Концентрация витающей пыли в воздухе







Рисунок 3.29 – Результаты замеров концентраций витающей пыли и локальных расходов воздуха в зоне пересыпа с грузчика комбайна на самоходный вагон (сечение 2–2)

Распределение концентраций витающей в воздухе пыли в сечении 2 - 2 получилось аналогичным результатам, полученным в сечении 3 - 3. Анализ распределения потоков воздуха, выполненный посредством оценки точечных скоростей воздуха, показал, что большая часть воздуха, подаваемая в забой ВМП, не доходит до поверхности забоя. При этом в зоне вокруг самоходного вагона создаются завихрения, которые значительно ухудшают пылевую обстановку в тупиковой горной выработке, проветриваемой нагнетательным способом. На рисунке 3.30 представлены результаты замеров, произведенных в сечении 1–1.

Концентрация витающей пыли в воздухе



Точечные скорости воздуха



Рисунок 3.30 – Результаты замеров концентраций витающей пыли и локальных расходов воздуха в зоне пересыпа с грузчика комбайна на самоходный вагон (сечение 1–1)

В ходе проведения серии замеров в сечении 1–1 установлено, что средняя концентрация по сечению имеет значение 5250 мг/м³ (1050 ПДК).

Произведенные замеры позволили верифицировать трехмерную модель турбулентного тепломассопереноса в тупиковой комбайновой выработке. В итоге по результатам полученных значений концентраций витающей пыли в воздухе и точечных расходов воздуха была произведена параметризация и верификация построенной модели на базе программного комплекса Ansys.

На рисунках 3.31 и 3.32 представлено сравнение профилей компоненты скорости воздушного потока по высоте тупиковой выработке в сечениях 2–2 и 3–3 с натурными измерениями. Из представленных профилей видно, что численная модель верно предсказывают наблюдаемую в левой части сечений 2–2 и 3-3 тупиковой выработки воздушную струю воздуха, выходящую из вентиляционного рукава в нижней части выработки, замедление течения воздуха в средней части выработки и возникновение возвратного течения возле кровли выработки. В сечении 3–3 с правой стороны комбайна численное моделирование так же, как и натурные измерения, указывает на слабое возвратное течение в сторону устья выработки.





Рисунок 3.31 – Сравнение измеренных и вычисленных профилей компоненты скорости воздушного потока по высоте тупиковой выработки в сечении 2–2, проходящем через самоходный вагон

Рисунок 3.32 – Сравнение измеренных и вычисленных профилей компоненты скорости воздушного потока по высоте тупиковой выработки в сечении 3–3, проходящем через проходческо-очистной комбайн

Количественное согласование результатов численного моделирования с натурными измерениями является удовлетворительным. Незначительные отклонения в рассчитанных и измеренных значениях скорости связаны с отклонением течения воздушного потока в тупиковой выработке от строго стационарного режима численной модели во время измерений, невозможностью воспроизведения при численном моделировании всех особенностей турбулентного течения пылегазовоздушной смеси влажного воздуха.

На рисунках 3.33–3.34 показаны рассчитанные и измеренные профили размерной концентрации пыли *С* по высоте тупиковой выработки в сечениях 2-2 и 3-3.



Рисунок 3.33 – Сравнение измеренных и вычисленных профилей концентрации пыли по высоте тупиковой выработки в сечении 2–2, проходящем через самоходный вагон

Рисунок 3.34 – Сравнение измеренных и вычисленных профилей концентрации пыли по высоте тупиковой выработки в сечении 3–3, проходящем через проходческо-очистной комбайн

Среднее относительное отклонение от замеренных точек δ_{cp} составляет 8 %. Таким образом, представленные графики подтверждают верность построенной математической модели физических процессов распространения воздушных потоков и концентраций пыли в тупиковом комбайновом проходческо-очистном забое.

3.6 Выводы

- Моделирование динамики пылевого аэрозоля в тупиковой комбайновой выработке в трехмерной постановке можно с достаточной степенью детальности описания проводить с помощью коммерческого вычислительного пакета Ansys Fluent, основанного на методе конечных объемов.
- 2. Проведенные тестовые численные расчеты и анализ существующих моделей турбулентности показали, что наилучшая сходимость итерационного процесса получения стационарного решения наблюдается при использовании k-ε «Realizable» модели. В ней же наблюдались наиболее реалистичные картины основных структур воздушных потоков. Данная модель выбрана нами проведения численного моделирования процессов проветривания в тупиковой комбайновой выработке и может быть рекомендована другим исследователям.

- 3. Используя инструменты, заложенные в программном пакете Ansys Fluent, в при численном моделировании относительно несложно воспроизвести процессы проветривания в тупиковом комбайновом забое при работе комбайнового комплекса.
- Сравнение результатов численного моделирования с результатами экспериментальных исследований показало, что выбранная численная модель (с принятой моделью турбулентности k-є «Realizable») позволяет получать достоверные данные.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ ТУПИКОВОЙ КОМБАЙНОВОЙ ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПРОВЕТРИВАНИЯ

4.1 Физические процессы проветривания тупиковой комбайновой выработки

Движение воздуха и содержащихся в нем вредных примесей в атмосфере тупиковых 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.

Доминированию механизмов смешения и перемешивания больше соответствует нагнетательный способ проветривания.

Описание этих физических процессов может быть продемонстрировано традиционно часто используемым в рудничной аэрологии классическим одномерным уравнением конвективно-диффузионного переноса концентрации вредной примеси *C* [155]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + F, \qquad (4.1)$$

где U — скорость потока, как правило, средняя по расходу, м/с; t — временная координата, c; D — эффективный коэффициент диффузии, в данном случае объединяющей молекулярную и турбулентную диффузии, а также Тейлоровскую дисперсию, х — пространственная координата вдоль горной выработки, м; F — источник (сток) примеси, ед. примеси/с.

Второе слагаемое слева уравнения (4.1) отвечает за конвективное (адвективное) вытеснение (чистый трансляционный перенос), а первое слагаемое справа — за перемешивание, которое может иметь различную природу.

Если положить *D*=0, то уравнение (4.1) перейдет в модель идеального (поршневого) вытеснения, в которой весь загрязненный воздух вытесняется без перемешивания из горной выработки. Это вытеснение длится некоторый период времени t_{ив}, равный:

$$t_{\rm HB} = V/Q, \qquad (4.2)$$

где V — объем выработки, m^3 , занятый вытесняемым воздухом, загрязненным или не загрязненным, Q — расход свежего воздуха, подаваемый в выработку, m^3/c . Данное время «вытеснения», как легко понять, является минимально возможным и самым эффективным, поскольку позволяет вытеснить без перемешивания весь загрязненный воздух, и тем самым проветрить горную выработку.

В рамках модели идеального перемешивания (смешения) проветривание любого объема, строго говоря, длится бесконечно долго, поскольку движения воздуха все время размешивают и размешивают остатки загрязнителя.

На практике время идеального перемешивания t_{ип} для проветривания горной выработки определяют исходя из гигиенических критериев достижения некоторой «конечной» концентрации примеси. Это условие чаще всего реализуется через требование того, чтобы в выработку поступил такой объем свежего воздуха Qt_{ип}, которого достаточно для разбавления и вытеснения разбавленной смеси со средней концентрацией С по проветриваемому объему от начальной концентрации загрязнителя C₀ до предельнодопустимой концентрации C_{пдк}. Время такого «нормативного» проветривания определяется формулой Швыркова-Воронина:

$$t_{\rm MII} = \frac{V}{Q} \ln\left(\frac{C_0}{C_{\rm IIGK}}\right). \tag{4.3}$$

Такой подход, как показала практика, хорошо соответствует реальности, особенно для камерообразных выработок или призабойной зоны тупиковой выработки, где размеры сечений соотносятся с длиной выработки или зоной проветривания [172].

Характерные временные зависимости динамики концентрации вредных примесей (в безразмерных координатах) в рамках каждого из двух вышеперечисленных подходов представлены на рис. 4.1–4.2. Красной пунктирной линией отмечена линия ПДК. В качестве характерного времени τ , по которому производился расчет безразмерного времени, принималась величина:

$$\tau = \frac{V}{Q}.\tag{4.4}$$





Рисунок 4.1 — Зависимости максимальной по проветриваемому объему безразмерной концентрации вредности от безразмерного времени проветривания горной выработки. Сплошная линия — модель идеального перемешивания; штриховая линия — модель идеального вытеснения

Рисунок 4.2 – Зависимости средней по проветриваемому объему безразмерной концентрации вредности от безразмерного времени проветривания горной выработки. сплошная линия — идеальное перемешивание, штриховая линия идеальное вытеснение; точки результаты численного моделирования

Из данных рис. 4.1 и рис. 4.2 следует, что в модели идеального перемешивания средняя и максимальная концентрация загрязнителя в объеме не различаются (они совпадают), поскольку предполагается, что происходит перемешивание смеси до однородного состояния.

Для модели идеального вытеснения ситуация другая — средняя по всему объему выработки, и загрязненному до проветривания и чистому после проветривания, и максимальная концентрация в загрязненной части различны. Первая все время меняется по линейному закону, а вторая – постоянна.

Из рисунка 4.2 видно, что численная кривая, соответствующая нагнетательному способу проветривания, имеет ярко выраженный экспоненциальный характер, что неудивительно, поскольку струя создает огромный вихрь перемешивания в тупиковой части забоя.

Напротив, численная кривая, соответствующая всасывающему способу проветривания, близка к прямой линии на временном отрезке [0; 1], в то время как при больших временах $t > \tau$ она близка к нулю, а ее незначительное изменение происходит по экспоненциальному закону.

Результаты численного моделирования подтверждают тот факт, что при применении нагнетательного способа проветривания в тупиковой выработке преобладает механизм перемешивания, в то время как при применении всасывающего способа — механизм вытеснения.

Иначе говоря, вышеприведенный анализ показывает, что процессы перемешивания увеличивают объемы загрязненного воздуха до объема всей проветриваемой области и тем самым время проветривания выработки до допустимых концентраций увеличивается. Следовательно, процессы вытеснения более эффективны, более рациональны, являются более ресурсосберегающими, чем процессы перемешивания.

Реализация предлагаемого подхода – усиление процессов вытеснения трудно осуществима при использовании нагнетательного способа проветривания, характеризующегося высокой «вихрегенерирующей» способностью и турбулентностью в призабойном пространстве, что является существенным «минусом» с точки зрения нормализации пылевой обстановки.

Более того, классическое требование правил безопасности к среднему по всему объему выработки содержанию примеси не позволяет «выявить» преимущества всасывающего способа проветривания и доминирование в нем процессов вытеснения. Для «манифестации» процесса вытеснения нудно разбить все воздушное пространство тупиковой выработки минимум на две зоны с разным средним содержанием примеси. Только тогда будет наглядно виден процесс «вытеснения» одного объема воздуха другим.

Рассмотрим теперь более детально всасывающий и нагнетательный способы проветривания тупиковой выработки.

С точки зрения процессов проветривания тупиковая выработка, проветриваемая с помощью вентиляционного трубопровода, делится концом става вентиляционных труб (с притекающим или утекающим потоками) на две зоны, не совпадающие с технологическими зонами размещения оборудования и отбитой горной массы. Одной зоной выступает аэродинамически выделенное пространство разворота струй воздуха, которое часто называют призабойным пространством, а другой - пространство протяжения выработки вне забоя, представляющее собой сквозной аэродинамический канал рис. 4.3.



Рисунок 4.3 – Схема нагнетательного проветривания

Как уже было отмечено выше, выходящий из вентиляционного става поток воздуха образует вихрь и загрязненный пылью частично возвращается обратно.

Всасывающий способ, напротив, характеризуется спокойным движением свежего воздуха по всей длине выработки (рис.4.4) до сечения всаса.



Рисунок 4.4 – Схема всасывающего проветривания

Все это свидетельствует в пользу необходимости выработки нового подхода к проветриванию тупиковых комбайновых проходческо-очистных забоев. Особенно это актуально для калийных и соляных рудников при невозможности практического применения других средств борьбы с пылью при высокой производительности, а, следовательно, скорости подвигания забоя.

Основой такого подхода может стать зонирование пространства забоя на несколько зон. Будем их называть «микрозоны». При таком новом многозональном подходе не ставится задача обеспечить предельно допустимую концентрацию пыли 5 мг/м³ воздуха во всем пространстве тупиковой комбайновой проходческо-очистной горной выработки, а лишь в определенных микрозонах, например, в зонах дыхания машиниста комбайна и машиниста самоходного вагона.

4.2 Результаты численного моделирования процессов проветривания при использовании нагнетательного способа проветривания тупиковой комбайновой выработки

Нагнетательный способ проветривания на сегодняшний день является единственным разрешенным способом проветривания тупиковых забоев. Основным достоинством данного способа проветривания справедливо считается определенная дальнобойность воздушной струи, выходящей из вентиляционного става, что позволяет создавать в призабойной части горной выработки интенсивное вихреобразование, способствующее недопущению возникновения застойных зон, что существенно при газовыделении взрывоопасных и ядовитых газов. Однако нагнетательный способ проветривания обладает и рядом существенных недостатков. Во-первых, при нагнетательном способе проветривания воздух, содержащий в своем составе вредные газообразные и аэрозольные примеси, выделяемые в технологическом процессе, свободно движется по горной выработке к ее устью полностью заполняя весь ее объём. При этом необходимо отметить, что загрязненный воздух свободно движется по выработке, в которой работает самоходный вагон, управляемый горнорабочим, т. е. при нагнетательном способе проветривания машинист самоходного вагона вынужден работать в атмосфере, содержащей не только пыль, метан, но и сероводород, относящийся к ядовитым газам.

Предварительные расчеты и натурные наблюдения фиксируют наличие крупного вихря, образующегося при нагнетательном способе проветривания, который существенно ухудшает состав атмосферы в призабойной части. Превалирование процесса смешения закономерно требует подачи такого количества свежего воздуха, которое смогло бы разбавить выделяющиеся вредности. Однако, требуемое для этого количество воздуха технически невозможно подать в забой (а с учетом множества таких забоев и в рудник). Необходимо искать иной путь обеспечения нормального качества рудничного воздуха на рабочих местах.

Нами с использованием модели, описанной в главе 2, проведен ряд численных экспериментов с различными условиями. В частности, рассматривалось влияние на состав атмосферы в зоне работы машиниста комбайна различных расходов свежего воздуха, подаваемого по вентиляционному ставу.

На рисунке 4.5 представлена визуализация результатов численного эксперимента. Условия эксперимента были следующими: нагнетательный способ проветривания, отставание вентиляционного става от кабины машиниста комбайна 10 м, скорость воздуха, выходящего из вентиляционного става, 19,4 м/с, диаметр вентиляционного става 0,5 м. Таким образом, количество воздуха Q, подаваемое на проветривание, составляло 3,8 м³/с.

Визуализация результатов численного эксперимента наглядно показывает, как струя воздуха, выходящего из вентиляционного става, расположенного с левой стороны комбайна, движется по направлению к забою и кабине машиниста комбайна. При этом рабочее место машинисте комбайна достаточно сильно запылено. Причиной этого является крупный вихрь, образующийся при таком способе подачи воздуха. Свежая струя воздуха с высокой скоростью движется по направлению к забою с правой стороны комбайна, подхватывает пылевоздушную смесь, образующуюся при разрушении пласта, выделяющиеся газы и движется в обратном направлении преимущественно с левой

127

стороны комбайна. При этом на виде сверху (рис. 4.5) отчетливо видно, что часть воздуха, омывая бункер-перегружатель и подхватывая пыль, выделяющуюся в процессе ссыпания руды в бункер, возвращается к забою, проходя через кабину машиниста комбайна. Эта картина хорошо согласуется с данными визуальных наблюдений.



Рисунок 4.5 – Визуализация течения потоков воздуха в выработке при нагнетательном способе проветривания (Q = 3,8 м³/c). Цветом показана концентрация пыли в пространстве рабочей зоны

Таким образом, можно отметить, что распространенное мнение о том, что при нагнетательном способе проветривания происходит простое вытеснение загрязненного воздуха из забоя, не подтверждается. Наличие вихря серьезно ухудшает пылевую обстановку в районе кабины машиниста.

Кроме того, в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей температура воздуха в выработках рудников составляет +10, +12 ⁰C, а интенсивный воздушный поток свежего воздуха с такой температурой и скоростью воздуха в районе кабины машиниста 2–2,5 м/с формирует некомфортные условия труда горнорабочего, что является еще одной негативной стороной нагнетательного способа проветривания.

Предположив, что ситуация с образованием вихря характерна лишь для определенных скоростей воздуха, выходящего из вентиляционного става, были проведены вычисления при измененных условиях проветривания с использованием возможностей численного моделирования. В частности, были рассмотрены процессы проветривания при увеличении подачи воздуха в 2 раза и снижении количества воздуха, подаваемого на проветривание, также в 2 раза. Результаты вычислений показали, что качественная картина движения воздушных потоков в пространстве рабочей зоны осталось неизменной (рис 4.6). Вихрь, зафиксированный при стандартных условиях проветривания, присутствует как при снижении подачи воздуха (соответственно и скорости струи воздуха, выходящей из вентиляционного става) так и при увеличении количества воздуха, подаваемого на проветривание.

Наличие такого вихря определяется несколькими объективного характера обстоятельствами. Во-первых, необходимостью разворота потока воздуха, направляемого в тупик. Разворачиваясь, воздушная струя неизбежно образует целую систему вихрей различного размера и расположения. Во-вторых, неизбежностью расширения струи свежего воздуха, означающего «подсосы» воздуха из рядом расположенного пространства. В-третьих, наличие фундаментального закона природы – закона неразрывности потока, фактически требующего, чтобы на место «подсосанного» объема воздуха «пришел» другой. Все это формирует вихревое движение в масштабах всего забоя. При этом, исходя из законов физики, чем большее количество воздуха мы будем подавать, чем большую скорость будет иметь поток, вытекающий из труб одного и того же сечения (стандартно 0,5 м), тем больше будет у этого потока кинетическая энергия, тем сильнее и масштабнее будет «крутиться» вихрь в забое.



Рисунок 4.6 – Визуализация воздушных потоков при различных значениях количества воздуха, подаваемого на проветривание

Обоснуем вышесказанное. Для этого рассмотрим количественные значения скорости воздуха и концентрации пылевого аэрозоля на различных расстояниях от забоя при разных количествах воздуха, подаваемого на проветривание.

На рисунке 4.7 изображены профили скорости с правой и левой (рабочее место машиниста комбайна) сторон на расстоянии 6м, 9 м, 20 м, 25 м, 30 м от забоя.

Расстояние от 6 до 9 м до груди забоя характерно тем, что в этой зоне наиболее часто находится машинист комбайна и его «зона дыхания».

Данный рисунок подтверждает сделанный ранее вывод о неизменности качественной картины движения воздуха – наличия вихря в забое.

Профили скорости слева от комбайна



интенсивностях проветривания

В количественном выражении, если рассматривать зону, расположенную с левой стороны комбайна, можно отметить, что на высоте от 0 до 0,5 м скорость потока существенно

различается - от 4,1 м/с при минимальной подаче до 18 м/с при максимальной подаче воздуха (характерно лишь для расстояния 9 м от забоя). Такой характер кривых обусловлен тем, что замерная точка лежит на пути струи воздуха, выходящей из вентиляционного става. С увеличением высоты скорость потока в рассматриваемом сечении снижается. На расстояниях от 20 до 30 м (выработка, свободная от оборудования) скорость потока выравнивается и в количественном выражении соответственно находится в диапазоне от 2,5 до 0,5 м/с.

Правая сторона комбайна характеризуется иной картиной распределения скоростей воздуха по высоте. Относительно высокие скорости наблюдаются в сечениях 6 и 9 м по всей высоте выработки, на расстояниях от 20 до 30 метров скорости воздуха снижаются, профили скоростей также выравниваются, количественные значения соответствуют скоростям левой части.

Далее рассмотрим, как меняется концентрация пыли в районе кабины машиниста комбайна в зависимости от интенсивности проветривания. На рисунке 4.8 представлены значения концентрации пыли при стандартных (применяемых на производстве) условиях проветривания ($Q = 3.8 \text{ м}^3/c$).



Рисунок 4.8 – Массовая концентрация пыли слева от комбайна при подаче воздуха в количестве 3,8 м³/с

На рисунке видно, что концентрация пыли в пространстве рабочей зоны максимальна в зоне нахождения рабочего места машиниста (сечение на расстоянии 9 м) и составляет на высоте от 1,5 м до 2 м (зона дыхания горнорабочего) от 95 до 100 мг/м³ воздуха (порядка 20 ПДК). По мере удаления от забоя концентрация пыли снижается примерно до 75 мг/м³ воздуха (порядка 15 ПДК). Далее поток воздуха равномерно движется

по длине камеры к ее устью. По мере удаления от источника пылеобразования за счет оседания концентрация пыли неизбежно снижается.

Рассмотрим далее, как изменится массовая концентрация пыли на рабочем месте машиниста при увеличении подачи воздуха в 2 раза. На рисунке 4.9 представлены значения концентрации пыли при увеличении подачи воздуха до 7,6 м³/с.



Рисунок 4.9 – Массовая концентрация пыли слева от комбайна при подаче воздуха в количестве 7,6 м³/с

Графики, представленные на рисунке 4.9 показывают, что увеличение количества воздуха, подаваемого нагнетательным способом проветривания, в два раза (от 3,8 м³/с до 7,6 м³/с), не приводит к снижению концентрации пыли в зоне дыхания машиниста комбайна. Более того, результаты численного эксперимента говорят о некотором увеличении массовой концентрации пыли на высоте от 1,5 до 2 м (в районе кабины машиниста). Это связано с более масштабным захватом пыли основными вихрями, а также со сдувом и взметыванием пыли из-за повышения скоростей движения воздуха относительно горной выработки и горнодобычного оборудования.

Интересные результаты получены в ходе численного эксперимента со снижением количества подаваемого воздуха с 3,8 м³/с до 1,9 м³/с (в два раза по отношению к стандартным условиям). На рисунке 4.10 представлены значения концентрации пыли с левой стороны комбайна при уменьшении подачи воздуха до 1,9 м³/с.



Рисунок 4.10 – Массовая концентрация пыли слева от комбайна при подаче воздуха в количестве 1,9 м³/с

Результаты, представленные на рисунке 4.10, показывают, что при снижении количества воздуха, подаваемого на проветривание тупикового комбайнового забоя, массовая концентрация пыли в районе кабины машиниста комбайна также снижается. Наиболее наглядно это можно проследить на диаграмме, представленной на рисунке 4.11.

Это подтверждает вышеописанную роль основного вихря в формировании пылевой обстановки на рабочем месте машиниста комбайна.



Рисунок 4.11 – Зависимость концентрации пыли в районе кабины машиниста комбайна от количества подаваемого воздуха

Из диаграммы, представленной на рисунке 4.10, видно, что при снижении подачи воздуха концентрация пыли снижается практически линейно. Очевидно, что при

дальнейшем снижении количества подаваемого воздуха до определенных значений, концентрация пыли начнет возрастать, так как источник пылевыделения (работающий комбайн) не перестаёт генерировать пыль. Функция концентрации пыли будет иметь один ярко выраженный минимум (рис. 4.12).



Рисунок 4.12 – Принципиальная зависимость концентрации пыли от количества подаваемого воздуха

Такой вид зависимости напоминает известный факт о наличии критической скорости воздуха, при превышении которой концентрация пыли начинает возрастать за счет перехода во взвешенное состояние уже осевших частиц. Этот механизм здесь, несомненно, присутствует, однако определяющим в данном случае является то, что при существенном изменении количества подаваемого воздуха сохраняется структура потока, а именно вихрь, показанный на рисунках 4.5–4.6. Меняется лишь интенсивность вихря.

Повторим, что чем больше расход воздуха, подаваемого при нагнетательном способе проветривания, тем выше скорость потока, выходящего из вентиляционного става, а значит выше интенсивность вихря, проходящего через бункер-перегружатель и, как следствие, он захватывает больше пыли и несет её к рабочему месту машиниста комбайна. Подтверждением этого служит тот факт, что на расстоянии 25 м от забоя за комбайном и бункером-перегружателем, где скорость воздуха по сечению выработки выравнивается, концентрация пыли примерно одинакова (72–75 мг/м³) при любом значении подаваемого в забой количества воздуха (в рамках рассматриваемого диапазона).

Таким образом, увеличение подачи воздуха при нагнетательном способе проветривания приводит к возрастанию концентрации пыли. На первый взгляд может показаться, что минимизировать концентрацию пыли в зоне дыхания горнорабочего можно, определив оптимальное значение подаваемого воздуха. Это утверждение было бы справедливым, если при добыче руды не будут выделяться другие вредности, такие как горючие и ядовитые газы. Практика показывает, что количество воздуха, требуемое для разбавления этих газов до безопасных концентраций, как правило, будет превышать значения, необходимые для минимизации концентрации пыли. То есть, наблюдается объективное и непреодолимое противоречие. В связи с этим необходимо рассматривать другие пути нормализации пылевой обстановки.

Этих недостатков лишен всасывающий способ проветривания. Поэтому далее рассматриваются результаты численных экспериментов, моделирующих различные условия организации всасывающего способа проветривания.

4.3 Результаты численного эксперимента при использовании всасывающего способа проветривания тупиковой комбайновой выработки с помощью штатной системы пылеулавливания

Численное моделирование пылевой обстановки в тупиковом комбайновой забое при всасывающем способе проветривания производили при различных условиях его организации. В данном подразделе описывается вариант организации проветривания с неизменным местом всасывания воздуха, предлагаемым штатной системой пылеулавливания.

Штатное место вентилятора пылеотсоса – место всаса исходящей из забоя струи воздуха расположено примерно в том же поперечном сечении, что и кабина машиниста комбайна - с правой стороны комбайна. Однако при проведении экспериментальных замеров на комбайне, выделенном для эксперимента, место забора воздуха было по техническим причинам смещено ближе к центру (рис. 4.13). В связи с этим для сравнимости результатов численного эксперимента расчеты проводились при этих условиях.



Рисунок 4.13 – Место расположения всаса вентилятора пылеотсоса

Напомним, что каждый проходческо-очистной комбайн типа «Урал» оснащен системой пылеулавливания, состоящей из всасывающего вентилятора и тканевого фильтра. Как уже было сказано выше, данная система крайне неэффективна, так как тканевый фильтр забивается пылью за очень короткий промежуток времени.

Идея численного эксперимента состояла в том, чтобы оценить эффективность организации всасывающего способа проветривания, использовав при этом в качестве источника тяги штатный вентилятор пылеотсоса. Для этого к выхлопу вентилятора (вместо тканевого фильтра) подсоединяли вентиляционный став, по которому запыленный воздух удаляется из выработки (на выемочный штрек или в отработанные камеры). Этот вариант организации всасывающего способа проветривания хорош тем, что не требует существенных затрат на его внедрение.

При этом проведена оценка пылевой обстановки при различных интенсивностях всасывания: стандартная (обеспечивает штатный вентилятор пылеотсоса) – 3,12 м³/с; увеличенная в 1,5 раза – 4,68 м³/с; уменьшенная в 1,5 раза – 2,08 м³/с.

На рисунке 4.14 представлены профили, показывающие концентрацию пыли по высоте с левой стороны комбайна при стандартных условиях (Q = 3,12 м³/с).



Рисунок 4.14 – Профили массовой концентрации пыли по высоте с правой и левой сторон комбайна

Результаты моделирования, представленные на рисунке 4.14 показывают, что при всасывающем способе проветривания концентрация пыли возрастает по мере увеличения высоты. С левой стороны комбайна на высоте 2 м концентрация пыли составляет от 48 мг/м³ до 60 мг/м³ (зона 6-9 м от щита), на высоте 3 м уже от 85 мг/м³ до 92 мг/м³. Похожая картина наблюдается и с правой стороны комбайна. Это говорит о равномерности движения воздушных потоков, что подтверждается визуализацией течения воздуха, представленной на рисунке 4.15.



Рисунок 4.15 – Течения воздуха в выработке. Цветом показана концентрация пыли

Кроме того, можно отметить, что на всем протяжении горной выработки в свежем воздухе наблюдается некоторая концентрация пыли - 32 мг/м³, хотя на первый взгляд воздух должен быть чистым. Дело в том, что в реальных условиях вентиляционной сети абсолютно чистого свежего воздуха без пыли (особенно зимой) не бывает. Фоновые значения пыли достаточно велики. Более того вентиляционный став, по которому удаляется воздух, редко бывает абсолютно герметичным, поскольку состоит из отдельных, состыкованных между собой звеньев. Поэтому в принципе запыленный воздух из вентиляционного става может попадать в воздушное пространство выработки.

Поэтому при проведении экспериментальных исследований всасывающего способа проветривания была зафиксирована величина массовой концентрации пыли в свежем воздухе в количестве 32 мг/м³. При последующем моделировании к расчету принималась именно эта величина. Это значение несколько выше фонового значения концентрации пыли на свежей струе, поступающей на выемочный штрек (для условий Верхнекамского месторождения это примерно 4–10 мг/м³).

Численный эксперимент (как и натурные измерения) показывают, что хотя всасывающий способ проветривания показывает хорошие результаты, концентрация пыли в зоне дыхания машиниста комбайна еще довольно высока.

По аналогии с нагнетательным способом рассмотрим, как влияет на концентрацию пыли изменение интенсивности проветривания. Для этого смоделируем ситуацию с уменьшением и увеличением производительности вентилятора в 1,5 раза. На рисунке 4.16. представлены профили распределения концентрации пыли по высоте при сниженной производительности вентилятора в 1,5 раза (до 2,08 м³/с).



Рисунок 4.16 – Профили концентрации пыли по высоте с правой и левой сторон комбайна

Результаты численного эксперимента, представленные на рисунке 4.16 свидетельствуют о том, что снижение производительности вентилятора в 1,5 раза приводит к увеличению концентрации пыли на высоте 2 м. Количественно массовая концентрация возросла не очень выражено, с 48–60 мг/м³ до 66–72 мг/м³, однако важным является вывод, что качественно при всасывающем способе проветривания снижение производительности вентилятора приводит к возрастанию концентрации пыли.

На рисунке 4.17 представлено изображение течения воздушных потоков при сниженной подаче всасывающего вентилятора.



Рисунок 4.17 – Течения воздуха в выработке при сниженной в 1,5 раза производительности вентилятора. Цветом показана концентрация пыли

Картина движения воздушных потоков ожидаемо схожа с ситуацией при стандартных условиях (рис. 4.15). Основные пылевые потоки концентрируются в верхней части выработки (из-за нагретости двигателей и большей «свободы» для движения воздуха). При этом зона с интенсивной запыленностью распространяется значительно дальше от щита, что связано с пульсациями давления за щитом из-за движения режущего органа. Пространство выработки за добычным комплексом (вплоть до устья выработки) характеризуется фоновыми концентрациями.

Следующим этапом проведены вычисления при увеличенной 1.5 раза производительности вентилятора пылеотсоса. Результаты вычислений при условии увеличения производительности всасывающего вентилятора в 1,5 раза от стандартных условий (до 4,68 м³/с) представлены на рисунке 4.18.



Рисунок 4.18 – Профили, концентрации пыли по высоте с правой и левой стороны комбайна при условии увеличения производительности всасывающего вентилятора до 4,68 м³/с

Результаты, представленные на рисунке 4.18, показывают, что увеличение производительности высасывающего вентилятора в 1,5 раза позволяет, как и ожидалось, снизить концентрацию пыли на расстоянии от 6 до 9 м от щита комбайна до значений 32– 52 мг/м³ (с левой стороны комбайна).

Область с правой стороны комбайна характеризуется более высокими значениями концентрации (однако там отсутствует постоянное рабочее место горнорабочего). Стоит отметить, что полученное значение 32 мг/м³ является фоновым, и в случае полного

отсутствия утечек воздуха из вентиляционного става, оно будет близко к допустимым значениям. На рисунке 4.19 представлена визуализация течения воздушных потоков при увеличении подачи воздуха в забой при всасывающем способе проветривания.



Рисунок 4.19 – Визуализация течения воздушных потоков при увеличении подачи воздуха

На рисунке 4.20 приведены результаты сравнения массовой концентрации пыли в зоне нахождения горнорабочего (на высоте 2 м). Поскольку речь идет о зоне, расположенной на расстоянии от щита от 6 до 9 м, то для удобства на диаграмме представлены средние значения концентраций.



Рисунок 4.20 – Результаты сравнения массовой концентрации пыли в зоне нахождения машиниста комбайна (на высоте 2 м, что выше зоны дыхания)

Результаты, представленные на рисунке 4.20, показывают, что в случае с всасывающим способом проветривания увеличение производительности всасывающего вентилятора приводит к снижению концентрации пыли на рабочем месте машиниста комбайна (в отличие от нагнетательного способа проветривания). На рисунке 4.21 представлено сравнение визуализации особенности течения воздушных потоков в зависимости от производительности всасывающего вентилятора.



Рисунок 4.21 – Сравнение визуализации особенности течения воздушных потоков в зависимости от производительности всасывающего вентилятора

Анализируя результаты, представленные на рисунке 4.21, можно заметить, что чем выше производительность всасывающего вентилятора, тем ближе пылевое облако удается прижать к груди забоя и кровле выработки. Если же говорить точнее, то к сечению, в котором расположено всасывающее отверстие вентилятора. Очевидно, что сечение выработки, в котором расположен всас вентилятора, является той границей, дальше которой невозможно отодвинуть пылевое облако. Как уже было сказано выше, кабина машиниста комбайна и всасывающее отверстие вентилятора расположены в одном сечении. Вероятно, что, смещение места всаса как можно ближе к забою позволит локализовать пылевое облако в призабойной части выработки, а кабина машиниста окажется в минимально запыленной атмосфере. Данное положение проверено в следующем подразделе.

Таким образом, выявлен ряд преимуществ всасывающего способа проветривания. Во-первых, он позволяет локализовать пылевое облако и тем самым снизить концентрацию пыли в отдельных зонах, в том числе и в зоне нахождения машиниста комбайна, во-вторых, на степень локализации пыли можно влиять, изменяя производительность всасывающего вентилятора.

4.4 Результаты численного эксперимента при использовании всасывающего способа проветривания по оценке изменения места всасывания воздуха

Для проверки предположения о повышении эффективности всасывающего проветривания при перемещении места всаса ближе к щиту, в условия моделирования внесены изменения. В частности, место всасывания воздуха было перенесено к щиту с правой стороны комбайна на расстояние 0,5 м от щита (рис. 4.22).



Рисунок 4.22 – Схематичное изображение нового места забора воздуха всасывающим вентилятором

На рисунке 4.23 показано течение воздушных потоков при смещении места всасывания к щиту комбайна. Интенсивность всасывания (расход в исходящей струе) соответствует стандартным условиям и составляет 3,12 м³/с.

ANSYS



Рисунок 4.23 – Визуализация течения воздушных потоков и концентрация пыли в выработке (показана цветом)

Если сравнить визуализацию результатов расчета всасывающего способа проветривания (при стандартных условиях $Q = 3,12 \text{ м}^3/\text{с}$) при размещении всаса вентилятора напротив кабины машиниста рис. (рис. 3.27 б) и в 0,5 от щита комбайна (рис. 4.23 а) можно отметить, что приближение места всаса к щиту позволяет еще сильнее локализовать пылевые потоки преимущественно с правой стороны комбайна в
непосредственной близости от щита. Такое перераспределение пыли позволяет снизить нагрузку на рабочее место машиниста комбайна.



Рисунок 4.24 – Сравнение результатов расчет всасывающего способа проветривания при различном расположении места всасывания: а) в 0,5 м от щита комбайна, б) напротив кабины машиниста комбайна

При этом запыленность частично фиксируется в сечениях, расположенных до кабины машиниста, что естественно, так как бункер-перегружатель так же, как и комбайн является генератором пыли. Однако стоит отметить, пыль, образующаяся при пересыпе руды в бункер-перегружатель, смещается к правой стороне выработки, противоположной кабине машиниста.

Сравнивая количественные значения массовых концентраций пыли в зоне нахождения машиниста комбайна, можно отметить, что при смещении зоны всаса к оградительному щиту концентрация пыли соответствует фоновым значениям, принятым в расчете. При этом с правой стороны комбайна (на уровне кабины) концентрация так же соответствует фоновой. Пыль, образующаяся при пересыпе руды в бункер-перегружатель, преимущественно локализуется в верхней центральной части с последующим смещением вправо.

Следующим этапом были проведены вычисления при увеличенной и сниженной производительностях всасывающего вентилятора. На рисунке 4.25 представлена визуализация результатов расчета всасывающего способа проветривания при условии смещения зоны всаса к оградительному щиту и увеличении производительности вентилятора в 1,5 раза (до 4.68 м³/с).



Рисунок 4.25 – Визуализация результатов расчета всасывающего способа проветривания при условии смещения зоны всаса к оградительному щиту и увеличении производительности вентилятора в 1,5 раза (до 4.68 м³/с)

Результаты расчета при увеличенной производительности вентилятора очень схожи с ситуацией при стандартной производительности (3,12 м³/с). На рисунке 4.26 приведено сравнение пылевой обстановки при стандартной и увеличенной производительностях вентилятора (рассмотрено сечение, в котором расположена кабина машиниста комбайна).

Пыль также локализуется в верхней центральной зоне, с последующим смещением к месту всаса, при этом как с правой, так и с левой стороны комбайна значения массовой концентрации пыли соответствуют фоновым.



Рисунок 4.26 – Сравнение пылевой обстановки при стандартной а) и увеличенной б) производительности вентилятора (рассмотрено сечение, в котором расположена кабина машиниста комбайна)

Снижение производительности вентилятора в 1,5 раза до величины 2,08 м³/с привело к увеличению области локализации пыли. В данном случае пыль локализуется в пространстве от оградительного щита до стрелы комбайна, т. е. область кабины машиниста комбайна оказывается запыленной рис. 4.27.



Рисунок 4.27 – Визуализация результатов численного эксперимента при смещении области «всаса» к щиту и сниженной (до 2,08 м³/с) производительности вентилятора

В количественном выражении концентрация пыли с правой стороны комбайна на расстоянии 6 метров от щита составляет порядка 140 мг/м³, с левой стороны комбайна увеличение концентрации пыли наблюдается на высоте до 1 м и свыше 2,5 м (рис. 4.28).



Рисунок 4.28 – Профили массовой концентрации пыли с правой (б) и левой (а) стороны комбайна

4.4. Результаты численного эксперимента при использовании всасывающего способа проветривания с рассредоточением мест всасывания воздуха

Как уже было сказано выше, выделение пыли при работе комбайнового комплекса происходит не только в процессе разрушения массива горных пород, но и в процессе ссыпания отбитой руды со стрелы комбайна в бункер-перегружатель и далее в самоходный вагон (рис. 4.29).



Рисунок 4.29 – Схема расположения оборудования: комбайн (1), бункер-перегружатель (2), самоходный вагон (3); места основного пылеобразования: отбойка руды в защитовом пространстве (4), пересып отбитой горной массы со стрелы комбайна в бункер-

перегружатель (5), пересып горной массы из бункера-перегружателя в самоходный вагон (6); рабочих мест: машиниста-оператора комбайнового комплекса (7) и машиниста

самоходного вагона (8), а также вентилятора пылеотсоса (9), существенно определяющего пылевую обстановку в забое

На рисунке 4.29 заштрихованы места пылевыделения. В связи с этим были рассчитаны варианты организации всасывающего способа проветривания с рассредоточением мест забора воздуха. В частности, был рассмотрен вариант, когда забор запыленного воздуха производится из двух мест.



Рисунок 4.30 – Схематичное изображение расположения рассредоточенных мест забора воздуха забора воздуха всасывающими вентиляторами

Первое место всаса традиционно для нашего исследования - 0,5 м от оградительного щита. Второе – в районе бункера-перегружателя. При этом необходимо отметить, что на рисунке 4.30 не нарисован воздуховод, что непринципиально для расчетов. При этом, по условию организации проветривания, 80 % воздуха забирается от оградительного щита, 20 % о места ссыпания руды в бункер-перегружатель. Расчёты численного моделирования произведены для тех же расходов воздуха, что и ранее (2,08 м³/с, 3,12 м³/с, 4,68 м³/с).

Как и в случае с вариантом проветривания, предусматривающим одно место забора воздуха (у заградительного щита), при расходах воздуха 3,12 м³/с и 4,68 м³/с в зоне размещения кабины машиниста комбайна (с левой стороны) массовая концентрация пыли соответствует фоновым значениям. С правой стороны (в зоне 6–9 м от щита), в отличие от варианта с одним местом забора воздуха, во всех случаях фиксируется повышенная запыленность, которая концентрируется на различных высотах.



Рисунок 4.31 – Профили массовой концентрации пыли с павой стороны комбайна при расходе воздуха а) 3,12 м³/с, б) 4,68 м³/с

При снижении расхода воздуха до 2,08 м³/с. Повышенная запыленность фиксируется как с правой, так и с левой стороны комбайна, рис. 4.32.



Рисунок 4.32 – Профили массовой концентрации пыли с левой а) и правой б) сторон комбайна при расходе воздуха 2,08 м³/с

Визуализация результатов расчета всасывающего способа проветривания с распределенными местами забора воздуха при различных расходах воздуха представлена на рисунке 4.33.



б) Q - 3,12 м³/с



в) Q - 2,08 м³/с



Рисунок 4.33 – Визуализация результатов расчета всасывающего способа проветривания с распределенными местами забора воздуха при различных расходах воздуха

В целом результаты расчета всасывающего способа проветривания с распределением двух мест забора воздуха показали наличие зависимости эффективности проветривания от расхода воздуха.

Как и в предыдущем варианте, пыль локализуется с правой стороны комбайна, однако дополнительное места забора воздуха оттягивает на себя часть запыленных воздушных потоков, тем самым расширяя запыленную область. Тогда как в случае с одним местом забора воздуха (от оградительного щита) наблюдается большая степень локализации пыли.

4.5 Выводы

По результатам проведенных исследований, направленных на изучение динамики пылевоздушных потоков в пространстве тупиковой выработки, можно сделать следующие выводы.

- Процессы перемешивания при использовании нагнетательного проветривания существенно увеличивают объемы загрязненного воздуха до объема всей проветриваемой области. Тем самым процессы идеального вытеснения более эффективны, более рациональны, являются более ресурсосберегающими.
- Наличие вихря, возвращающего пылевоздушные потоки обратно к кабине машиниста комбайна, при нагнетательном способе проветривания характерно в широком диапазоне количества подаваемого воздуха, причем его интенсивность растет с ростом подачи свежего воздуха.
- Увеличение количества воздуха, подаваемого на проветривание тупикового забоя при нагнетательном способе проветривания, приводит к ухудшению пылевой обстановки на рабочем месте машиниста комбайна.
- 4. Всасывающий способ проветривания позволяет локализовать пылевое облако и оттеснить его в правый угол забоя, максимально далеко от рабочего места машиниста комбайна, и тем самым снизить концентрацию пыли в зоне нахождения машиниста комбайна, причем на степень локализации можно влиять, изменяя производительность всасывающего вентилятора, при увеличении которой степень локализации возрастает.
- 5. Приближение места «всаса» к заградительному щиту позволяет локализовать пылевые потоки преимущественно с правой стороны комбайна в непосредственной близости от щита, тем самым кабина машиниста комбайна оказывается в атмосфере с минимальной концентрацией пыли. Таким образом, смещение области забора воздуха к оградительному щиту комбайна при всасывающем способе проветривания оказывается наиболее предпочтительным.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВСАСЫВАЮЩЕГО СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВОГО КОМБАЙНОВОГО ЗАБОЯ ПРИ ВЫДЕЛЕНИЯХ ВЗРЫВООПАСНЫХ И ЯДОВИТЫХ ГАЗОВ

5.1 Проблема обеспечения безопасности при наличии выделений природных газов из соляного горного массива калийных месторождений

Предыдущие исследования показывают эффективность всасывающего способа проветривания если речь идет о рабочих зонах, в которых выделяется значительное количество пыли. Однако не стоит забывать, что на калийных рудниках помимо пыли выделяются метан и сероводород. Наше исследование не могло обойти вопрос безопасности применения всасывающего способа проветривания при наличии газовыделений природных горючих (взрывоопасных) и ядовитых (токсичных) газов.

Известно, что по своему типу калийные месторождения относятся к осадочным, разработка данных месторождений осложняется выделением природных газов, содержащихся в продуктивных пластах и междупластьях. Скопления газа в калийных пластах и вмещающих породах представляют собой природные опасности и приводят к осложнениям при ведении горных работ. Обычные газовыделения связаны с выделением содержащихся в толще породы рассеянных свободных газов.

При проведении подготовительных выработок и очистных работах такие выделения природных газов происходят с обнаженных поверхностей массива (забоя, стенок, почвы и кровли), из шпуров, в момент взрывания из разрушенной массы породы и из отбитой породы, находящейся в забое выработки какое-либо время до ее выгрузки.

Однако нарушения в проветривании забоя, наличие микросуфляров могут привести к повышению концентрации горючих газов выше допустимой, что в сочетании с несоблюдением горнорабочими забоев правил безопасности приводит к аварийным ситуациям в виде вспышек, загораний и взрывов горючих газов, травматизму [123, 124, 110, 52]. Строго говоря за все время эксплуатации комбайновых комплексов таких явлений во время их работы, не наблюдалось. Все редкие инциденты были связаны с ремонтными работами и отсутствующей вентиляцией.

Газы, выделяющиеся при добыче калийной руды, можно разделить на горючие и ядовитые. Содержание и состав горючих газов в калийных пластах хорошо изучены, к ним относятся CH₄, H₂. О составе ядовитых газов в продуктивных пласта Верхнекамского месторождения в научных кругах до сих пор ведутся дискуссии, к примеру, есть данные о наличии в солях помимо серосодержащих газов оксида углерода [40, 122].

В таблице 5.1 приведены основные данные о газоносности и газообильности соляных и калийных месторождений [36].

Месторождение, страна, рудник	Основные газы	Газоносность, м ³ /м ³	Дебит газов, м ³ /сутки	Характер газовыделений	Последствия газовыделений
Верхнекамское (Россия) Соликамские (I-III) Березниковские (I-IV)	H ₂ , CH ₄ , TY, N ₂ , CO ₂	От 0,1-0,2 до 20,0	От 300-600 до 900 000	Из скважин и шпуров, при измельчении пород, при газодинамических явлениях	Взрывы, вспышки, загорания
Старобинское (Беларусь) Солигорские (I–IV)	CH4, N2, CO2	0 - 3,9	$100 - 1\ 000$	Из скважин и шпуров, при газодинамических явлениях	Взрывы, вспышки, загорания
Стебниковское (Украина) Стебник	CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , N ₂	0 – 2,8	До 700 - 800	Из шпуров и при дроблении пород	Возгорания
Калуш-Голянское (Украина) КалушГолынь	CH4, H2, CO2, N2,	0-2,5	400 - 1 000	Из скважин и при дроблении пород	Возгорания
Индерское (Казахстан) Индер	CH ₄	0 – 5,3	До 1 000 – 1 500	При взрывании и дроблении пород	Возгорания
Ереванское (Армения) Аван	CH ₄ , CO ₂	Нет сведений	Нет сведений	Из шпуров и при дроблении пород	Возгорания
Дуздакское (Азербайджан) Нахичевань	СН4, ТУ	Нет сведений	Нет сведений	Из шпуров и при дроблении пород	Возгорания
Кияви (Польша) Клодова Иновроцкая	CH4, ТУ, N2	0 - 4,4	До 15 000 м ³ газа и 800 т породы	При газодинамических явлениях	Возгорания
Южное Прикарпатье (Польша) БохняВеличка	СН4, ТУ	0 - 2, 1	Нет сведений	При отбойке руды и газодинамических явлениях	Возгорания
Верра (Германия) Эйнхайт Менценграбен и др.	CO ₂ , N2, CH4	6,6-44,0	До 700 000 м ³ газа и до 100 000 т породы	При газодинамических явлениях	Взрывы, вспышки, загорания

	Π		~			
1 ability 1 1 $$	Ланные (Газоносности	И ГАЗОООИЛЬНОСТИ	соляных и к	апииных	месторожлении
гиолици Э.1	Aumple (n rusooonsibiloe in		winninnin k	месторождении

Месторождение, страна, рудник	Основные газы	Газоносность, м ³ /м ³	Дебит газов, м ³ /сутки	Характер газовыделений	Последствия газовыделений
Южный Гарц (Германия) Томас Мюнцер и др.	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ ,	6,6 – 11,0	7 000–20 000 м ³ газа и до 4 000 т породы	При газодинамических явлениях	Взрывы, вспышки, загорания
Эльзас (Франция) Фернанд Амели и др.	CH ₄	0,1-16,0	10–100 000 м ³ газа	При газодинамических явлениях	Взрывы, вспышки

ТУ-тяжелые углеводороды

Поскольку тема настоящей работы напрямую не относится к изучению вопросов газоносности калийных месторождений, а посвящена эффективности проветривания тупиковых комбайновых забоев, то в вопросах борьбы с природными газами автор опирается на нормативные документы, регламентирующие работу рудника в условиях газового режима. В частности, на «Специальные мероприятия по безопасному ведению горных работ в условиях «газового режима» [144] и «Регламент технологического процесса «Организация проветривания на руднике ПАО «Уралкалий»» [129]. Для примера выбран рудник СКРУ-З ПАО «Уралкалий». Данный рудник выбран не случайно, именно на СКРУ-З фиксируются выделения как метана, так и сероводорода.

Согласно этим документам, количество воздуха, необходимое для проветривания призабойного пространства горных выработок (по природным газам), определяется по взрывоопасным газам (условному метану) и сероводороду. В связи с этим в дальнейшем в настоящей работе при рассмотрении процессов повышения эффективности проветривания учитываются именно эти газы.

В таблице 5.2 представлены средние значения газообильности по панелям рудника СКРУ-3.

Наименование	Пласт	Средняя газообильность	Средняя газообильность по		
рабочей зоны		по панели по условному	панели по сероводороду,		
		метану, м ³ /т	м ³ /т		
		2015			
Панель 15	АБ	0,08959104	0,00056681		
Панель 15	Кр-II	0,02084022	0		
Панель 17	Bc	0,00169245	0,00170587		
Панель 17	Кр-II	0,02677982	0		
Панель 18	Bc	0,14327473	0,00110911		
Панель 18	Кр-II	0,03734388			
Панель 9	АБ	0,02069184	0,00119895		
Панель 9	Кр-II	0,01373395			
Панель 10	АБ	0,08936285	0,0010756		
Панель 10	Кр-II	0,03615735	0		
Панель 12	АБ	0,03372387	0,0006266		
2016					
Панель 18	Bc	0,073167324	0,00097066		
Панель 15	АБ	0,064445355	0,00095		
Панель 15	Bc	0,077654964	0,00110385		
Панель 15	Кр-II	0,054553452	0		
Панель 9	АБ	0,079629508	0,001044101		
Панель 9	Кр-II	0,032413335	0		
Панель 17	Bc	0,089117165	0,001081771		
Панель 17	АБ	0,073102308	0,001012		
Панель 17	Kp-II	0,077884765			

	n	~	~	CILDY A
1 and 3 2 $-$	- Знапения относительн	ОИ ГАЗОООИЛЬНОСТИ В	пароцих зонах пулни	KA (K P V - 4
1 аблица 5.2		on rasoconsibility in b	риоб ил зопих рудии	Ra CICI 5 J

Наименование	Пласт	Средняя газообильность	Средняя газообильность по
рабочей зоны		по панели по условному	панели по сероводороду,
		метану, м ³ /т	M ³ /T
Панель 12	Bc	0,055269816	0,00098468
Панель 12	АБ	0,053533851	0,00087256
Панель 10	АБ	0,068178185	0,00090154
Панель 10	Кр-II	0,029145004	
Панель 11	Кр-II	0,033248911	
Панель 1 ВП	Кр-II	0,077389111	
		2017	
Панель 18	АБ	0,056942224	0,001176845
Панель 15	АБ	0,070231082	0,000674456
Панель 9	АБ	0,031849044	0,001123722
Панель 9	Кр-II	0,002423459	
Панель 10	АБ	0,013681432	0,00103420
Панель 11	Кр-II	0,098963425	
Панель 12	АБ	0,036155639	0,00096597
Панель 1ВП	АБ	0,009972173	0,00105152
Панель 1ВП	Кр-II	0,000426414	
Панель 10	Кр-II	0,002502589	
Панель 11	Кр-II	0,031389733	
Панель 17	Kp-II	0,096892589	

Анализируя результаты плановых газовоздушных съемок за три года, можно отметить, что большинство значений концентрации метана (фиксируемые во время проведения съемок) находятся в диапазоне 0,01–0,15% по объему (нормативно допустимая концентрация 0,5%), значения средней относительной газообильности по метану находятся в диапазоне 0,000426414–0,14327473 м³/т.

Сероводород (H₂S) обнаруживается на пластах АБ и Вс. Фиксируемые значения концентрации сероводорода вплотную приближаются к значениям предельно допустимой концентрации и могут достигать значений 0,0006512 % (предельно допустимая концентрация 0,00071%). Даже небольшое количество этого ядовитого газа, относящегося ко 2 классу опасности, смешанного со значительным объемом свежего воздуха, является опасным для здоровья и жизни горнорабочих. Следовательно, при наличии выделения сероводорода эффективным будет являться способ проветривания, позволяющий максимально локализовать выделяющиеся при работе комбайна газы и пыль вне нахождения постоянных рабочих мест, и уменьшить смешение их со свежим воздухом. Всеми этими преимуществами обладает всасывающий способ проветривания, позволяющий локализовать пылегазовую смесь в пространстве воздуховода. Однако определенные опасения при использовании всасывающего способа проветривания может

вызвать малый спектр всаса, который может не предупредить образование застойных зон с высокими значениями концентрации метана и/или сероводорода.

Напомним, при нагнетательном способе проветривания выделившийся метан и сероводород свободно движутся по тупиковой выработке, где постоянно находится машинист самоходного вагона, что является дополнительным аргументом о неоптимальности нагнетательного способа проветривания.

5.2 Исследование возможности образования застойных зон при применении всасывающего способа проветривания тупиковой комбайновой выработки

Известно, что скорость воздуха в спектре всасывания убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до рассматриваемой точки всаса, и на расстоянии, равном одному диаметру от сечения всасывающего трубопровода, уменьшается примерно в 16 раз [119]. Именно этот факт и является основным и убедительным аргументом противников применения всасывающего способа проветривания при наличии газовыделений.

Однако, нужно принять во внимание то, что данная ситуация справедлива лишь для условий пустого тупикового забоя, проветриваемого всасывающим способом (такая ситуация характерна для проветривания забоя после взрывных работ), воздушное пространство которого, не подвергается никаким другим воздействиям. Заметим, что любое воздействие на воздушную среду вызывает его движение, которое в тупиковой выработке из-за закона непрерывности быстро делается вихревым, что, в принципе разрушает практически все застойные зоны.

Такие воздействия самого разного характера свойственны условиям тупиковой выработки, в которой размещен и работает комбайновый комплекс в составе проходческодобычного комбайна, бункера-перегружателя и самоходного вагона.

Самое простое и наглядное воздействие на воздушную среду всего воздушного пространства тупиковой выработки оказывает движение самоходного вагона. Занимая достаточно значительную часть сечения тупиковой выработки, вагон «работает» как своеобразный поршень, вызывая две мощные волны – при заезде и движении, и при выезде. Такие «челночные» движения осуществляются примерно каждые 2—3 минуты, что достаточно часто для воздушной среды. Ожидать в таких нестационарных условиях существование устойчивых «застойных зон» с высоким содержанием легкого метана или тяжелого сероводорода неправомерно.

158

Влияние бункера-перегружателя проявляется в работе крыльчатки охлаждения двигателя скребкового, а также в эффекте импульсного вытеснения воздуха при падении руды в пустой бункер. Влияние самого скрепкового конвейера минимально.

Наибольшее влияние на воздушную среду оказывает работа комбайна, режущий орган которого представляет собой своеобразную «мешалку», непрерывного действия, расположенную в самом опасном по газовыделениям месте – непосредственно у груди забоя. К сожалению, проведение замеров современной техникой в близости от режущего органа, пусть даже «прикрытого» щитом (от возможности разлета отбитых кусков руды), абсолютно исключено из-за соображений безопасности исследователя, а потому инструментально доказать невозможность образования там «застойных 30H» принципиально невозможно. Визуальные наблюдения позволяют понять невозможность существования «застойных зон» в высокоинтенсивном вихревом потоке с постоянно меняющейся структурой, но не являются, для многих теоретиков, научным доказательством.

Определенную лепту вносит и скребковый конвейер, подающий руду на постоянно вибрирующую стрелу погрузчика, и свободное падение потока руды в бункерперегружатель.

Кроме того, современные комбайны типа «Урал 20Р» оснащены 10-ю электроприводами, каждый из которых нагревается, а потому имеет принудительную систему воздушного охлаждения. Заметим, что даже с учетом работы воздушного охлаждения электродвигателей их температура может достигать 60 ⁰C.

Работа данных электродвигателей и их систем охлаждения не может не влиять на динамику воздушных потоков в призабойной части, вызывает дополнительную высокую турбулизацию вихревых потоков. Другими словами, наличие работающего оборудования в забое сводит к минимуму вероятность возникновения застойных зон, в которых могут образовываться слоевые скопления метана и сероводорода.

Однако точный ответ на этот вопрос можно получить, лишь проведя исследования распространения газовых примесей (с учетом их плотности) в пространстве рабочей зоны.

Для исследования движения потоков воздуха в тупиковой горной выработке с размещенным в ней работающим оборудованием воспользуемся описанной в главе 2 моделью.

Моделирование работы двигателей проводилось с учетом потока воздуха, который прокачивается через них для охлаждения (рис. 5.1). Геометрия формы двигателя была построена таким образом, что площадь входного и выходного отверстий равны.

159



Рисунок 5.1 – Вертикальное сечение двигателя. Цветом показано поле температуры

На рисунке 5.2. представлен пример визуализации результатов моделирования динамики воздушных потоков в тупиковом комбайновом забое при всасывающем способе проветривания с учетом влияния температурного нагрева приводов комбайна и их системы охлаждения. Данный расчет произведен при условии, что место всаса расположено в 0,5 м от заградительного щита, производительность всасывающего вентилятора составляет 1,12 м³/с.



Рисунок 5.2 – Результаты численного моделирования динамики воздушных потоков с учетом влияния температурного нагрева приводов комбайна и их системы охлаждения

Результаты численного эксперимента показывают, что каждый работающий привод создает конвективный поток воздуха, стремящийся подняться к кровле выработки, тем самым усиливает локальную турбулентность воздушных масс в районе электродвигателей и в призабойной части в целом.

При низких расходах всасывающего вентилятора можно наблюдать противоток нагретого воздуха под кровлей горной выработки.

Очевидно, что это будет влиять и на распределения газовых примесей, поступающих в выработку при разрушении массива горных пород.

Повторим, что в кругах горняков, особенно угольщиков, бытует устоявшееся мнение, что применение всасывающего способа проветривания опасно в условиях газовых шахт.

Данное утверждение можно считать справедливым, если рассматривать метан как основную примесь, постоянно выделяющуюся в большом количестве при проходке тупиковой выработки. В этом случае свободная струя воздуха при нагнетательном способе проветривания позволяет интенсивно перемешивать различные объемы воздушного пространства, не давая образовываться «застойным зонам» и устойчивым локальным скоплениям.

Если же если речь идет о выделяющихся вредностях, негативно влияющих на организм горнорабочего (пыли и ядовитых газах), то всасывающий способ проветривания будет предпочтительнее, что подтверждается результатами исследований распределения пыли, представленных в главе 4.

Для ответа на вопрос, возможно ли безопасное применение всасывающего способа проветривания тупиковой комбайновой выработки в случае, когда в забое одновременно выделяется значительное количество пыли, ядовитых газов (сероводорода) и метана одновременно, нами был проведен ряд численных экспериментов.

5.3 Исследование безопасности распространения метана и сероводорода в тупиковом комбайновом забое при всасывающем способе проветривания

Как уже было сказано выше, основными газообразными вредностями, выделяющимися при добыче калийных солей, являются метан и сероводород (на пластах АБ и В Верхнекамского месторождения калийных солей). Данные газы обладают различными свойствами, например, метан легкий газ, а сероводород – тяжелый, которые необходимо учитывать для получения корректных результатов в ходе численного эксперимента по изучению их динамики при различных способах проветривания.

На первом этапе для понимания ситуации и оценки самого численного решения была рассмотрена специальная модельная задача в упрощенной 2D постановке.

В задаче рассчитываются поля скоростей и концентраций в тупиковой горной выработке длины *L* и высоты *h* (рис. 5.3). Правая грань расчетной области домена – граница,

через которую воздушный поток попадает в горную выработку. Остальные три внешние грани домена являются твердыми непроницаемыми стенками, на которых задается прилипание воздушного потока. Слева на малом расстоянии *a* от забоя задано круговое отверстие, через границу которого воздушный поток покидает домен. Выделение метана имеет место на левой поверхности расчетной области – в забое горной выработки. Оно задается как граничное условие 2 рода.



Рисунок 5.3 – Геометрия расчетной области

Таким образом, в основном воздушный поток движется по горной выработке справа налево – от устья горной выработки к тупиковому забою. Это соответствует случаю всасывающего способа проветривания. На входе в домен задается однородная скорость воздуха *V*. Данное значение скорости обеспечивается работающим вентилятором, подсоединенным к вентиляционному трубопроводу. Вентилятор явно не моделируется.

Вблизи тупикового забоя задается источник газовыделения, распределенный по малому объему – вертикальному слою толщиной δ_1 . Источник имеет постоянную мощность газовыделения, равную W_1 .

В результате движения воздушных потоков в тупиковой горной выработке происходит перенос выделившегося газа из первоначальной области его выделения в другие зоны горной выработки, а также его разбавление. С учетом выбранной направленности движения воздушных потоков, выделившийся газ переносится воздухом к входу в вентиляционный трубопровод и далее по трубопроводу удаляется из горной выработки.

Предполагается, что закономерности движении газовоздушной смеси определяются соотношением трех основных механизмов переноса массы – вынужденной конвекции, характеризующейся скоростью V, силой плавучести, характеризующейся разностью плотностей (и, в свою очередь, определяемой интенсивностью выделения газа Q_1), и коэффициентом турбулентной диффузии D_t .

162

По этой причине все три указанных процесса были включены в математическую модель стационарного течения газовоздушной смеси в тупиковой горной выработке. Основные балансовые соотношения в модели представлены ниже:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{V} = \boldsymbol{0},\tag{5.1}$$

$$\boldsymbol{V} \cdot \nabla \boldsymbol{V} = -\frac{\nabla p}{\rho_0} + \nabla \cdot \left[(\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{\nu}_t) \nabla \boldsymbol{V} \right] + \boldsymbol{g} \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right), \tag{5.2}$$

$$\boldsymbol{V} \cdot \nabla \boldsymbol{c} = \nabla \cdot \left[(\boldsymbol{D} + \boldsymbol{D}_t) \nabla \boldsymbol{c} \right] + \boldsymbol{Q}_1 + \boldsymbol{Q}_2, \tag{5.3}$$

где **V** – вектор скорости, м/с; *p* – гидростатическое давление, Па; ρ_0 – плотность воздуха, не содержащего газ, кг/м³; *v* – молекулярная вязкость, м²/с; *v*_t – турбулентная вязкость, м²/с; *g* – вектор силы тяжести, м/с²; ρ – фактическая плотность газовоздушной смеси; *c* – объемная концентрация газа, м³/м³; *D* – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; *D*_t – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; *Q*₁ – распределенный источник газа вблизи тупикового забоя:

$$Q_1 = \frac{q}{60\delta_1 hw} \theta(\delta_1 - x), \tag{5.4}$$

q – суммарное количество выделяющегося в единицу времени газа, м³/мин; δ_1 , h и w – толщина, высота и ширина слоя, в котором выделяется газ, м; θ – функция Хэвисайда; Q_2 – искусственный сток газа (о нем будет сказано дальше), 1/с.

Ввиду того, что метан и воздух считаются перемешанными на молекулярном уровне, принималось, что у них единая скорость в каждой точке домена. Это соответствует смесевой модели многофазных течений [215]. При этом исследователи часто выделяют сразу несколько газовых фракций – кислород, азот, водяной пар и метан. [215, 190, 211].

Коэффициент турбулентной диффузии определяется исходя из турбулентной вязкости по формуле:

$$D_t = \frac{\nu_t}{Sc_t},\tag{5.5}$$

где Sc_t – турбулентное число Шмидта, равное 0,7 для воздуха. Данная величина наиболее часто используется при расчетах турбулентных течений воздуха [179]. Определение турбулентной кинематической вязкости v_t вели по [195].

На входной границе задавалось граничное условие постоянства скорости воздуха, нулевая концентрация газа, интенсивность турбулентности 5 %, отношение турбулентной и кинематической вязкостей, равное 10. На выходной границе задавалось нулевое статическое давление. На стенках задавалось прилипание потока.

Расчеты проводились в пакете ANSYS Fluent 2021 R2. Стационарное решение задачи искалось итерационно, а критерием остановки итерационной процедуры являлись

относительные невязки по всем искомым параметрам менее 10⁻⁴. Дополнительно проверялась независимость решения от сетки и граничных условий на входе.

На рис. 5.4 представлена конечно-объемная сетка, использованная для расчетов (9553 ячейки). Во внутренней части задавались треугольные конечные объемы, в то время как на границах (твердых стенках) задавался пограничный слой из прямоугольных конечных объемов. Вблизи конца вентиляционного трубопровода задано сгущение сетки для корректного отражения высоких градиентов скорости и давления воздушного потока.



Рисунок 5.4 – Расчетная сетка

На рис. 5.5 представлены распределения безразмерной концентрации газа в горной выработке при различных интенсивностях газовыделений и постоянной скорости воздуха на входе в расчетную область, равную 0,2 м/с. Безразмерная концентрация рассчитывалась по формуле:

$$C = 1.5 \frac{60c\delta_1 hV}{q}.$$
(5.6)

Знаменатель формулы (5.6) характеризует общую интенсивность газовыделения, а числитель – разбавляющую способность воздушного потока. Безразмерный множитель 1,5 введен в формулу (5.6) для улучшения цветовой гаммы при отображении полей концентрации. В целом, введенная безразмерная концентрация позволяет сопоставить поля концентрации для различных интенсивностей газовыделения и различных скоростей движения воздушной струи.

Максимальные концентрации метана во всех случаях наблюдаются на верхней границе горной выработки под кровлей, что связано с меньшей плотностью газа, а также тем, что основное движение воздуха направлено ближе к почве горной выработки, где находится конец всасывающего вентиляционного трубопровода.

Также было проанализировано расстояние, на которое распространяется газовое скопление вдоль кровли горной выработки при различных интенсивностях газовыделения. Ожидаемо видно, что с ростом интенсивности газовыделения у тупикового забоя дальность

распространения газового скопления у кровли горной выработки неограниченно возрастает, при этом максимальные значения безразмерных (но не размерных) концентраций падают. Максимальные размерные концентрации увеличиваются вместе с ростом интенсивности газовыделения: если при q = 0,0045 м³/мин максимальная концентрация составляет около 0,0026 м³/м³, то при q = 0,09 м³/мин уже около 0,016 м³/м³.



Рисунок 5.5 – Распределения концентрации газа в горной выработке при различных интенсивностях газовыделений: а) – 0,0045 м³/мин, б) – 0,009 м³/мин, в) – 0,018 м³/мин, г) – 0,045 м³/мин, д) – 0,09 м³/мин; красной линией отмечена граница распространения газового скопления против основного потока воздуха

На рис. 5.6 представлены векторные поля скорости газовоздушной смеси вблизи тупикового забоя при фиксированной интенсивности газовыделения (0,045 M^3/Muh) и различных скоростях движения воздушной среды. Из рис. 5.6 видно, что у забоя горной выработки может формироваться один или несколько вихрей различной формы и размера. Даже при относительно больших средних скоростях воздушного потока в горной выработке у тупикового забоя левее конца трубопровода величины скоростей ниже, а потому газовая (свободная) конвекция выражена существеннее, чем вынужденная конвекция. Это приводит к образованию устойчивого вихря (см. рис. 5.5 в). Далее по мере уменьшения скорости воздуха в горной выработке, зона вихря растет (см. рис. 5.5 а) и в какой-то момент

происходит разделение одного вихря на несколько. В случае скорости 0,1 м/с формируется уже 3 вихря с характерным размером более 1 м (см. рис. 5.5 а).



Рисунок 5.6 – Векторные поля скоростей воздушного потока в горной выработке при различных скоростях на входе: а) – 0,1 м/с, б) – 0,3 м/с, в) – 0,5 м/с

Представляет интерес зависимость дальности распространения газового скопления от забоя горной выработки как функции интенсивности газовыделений и скоростей воздушного потока. Под дальностью распространения газового скопления подразумевается такое расстояние *E* от левой границы области по оси *Ox* вдоль линии y = 2,95 м, на котором концентрация будет ниже 10^{-5} м³/м³. Так, например, на рис. 5.7 продемонстрировано то, как вычисляются дальности распространения газового скопления для интенсивностей газовыделения 0,09 м³/мин (*E*₁) и 0,0045 м³/мин (*E*₂).



Рисунок 5.7 – Профили концентрации газа вдоль линии у=2,95 м для двух различных интенсивностей газовыделения: 0,09 м³/мин (синяя кривая, E₁) и 0,0045 м³/мин (желтая кривая, E₂)

На рис. 5.8 представлены рассчитанные зависимости величины *E* от интенсивности газовыделения для 4 различных скоростей воздушного потока. В целом три кривые (для скоростей воздушного потока 0,2 м/с и выше) имеют вид, близкий к линейному. Чем выше скорость воздушного потока, тем меньше угол наклона соответствующей кривой и, следовательно, тем меньшее влияние оказывают газовыделения на дальность распространения газового скопления.

Для минимальной скорости воздуха (0,1 м/с) кривая E(q) ведет себя нелинейно: при интенсивностях газовыделения более 0,07 м³/мин происходит резкий рост дальности E до величины $L - \delta_2 - \tau$. е. до границы искусственного стока газа. Важно понимать, что в действительности при больших интенсивностях газовыделения и малых скоростях воздушного потока газовое облако будет распространяться на существенно большее расстояние, чем выбранные размеры расчетной области. По этой причине рассматриваемая модель имеет определенные ограничения по диапазону возможных параметров проветривания горной выработки и интенсивностей выделения газа.



Рисунок 5.8 – Зависимость дальности распространения газового скопления от забоя горной выработки от интенсивности газовыделений для четырех различных скоростей воздушного потока

Функцию дальности распространения газового скопления от забоя горной выработки удобно представить в фазовой плоскости основных параметров задачи – скорости воздуха V и интенсивности газовыделения q (см. рис. 5.9). Изолинии на рисунке соответствуют постоянным значениям дальности распространения газового скопления в диапазоне от 4 до 10 м.



Рисунок 5.9 – Изолинии дальности распространения газового скопления от забоя горной выработки в фазовой плоскости размерных параметров V-q

Проведенный выше анализ можно обобщить на случай произвольных параметров горной выработки, системы ее проветривания и источника газовыделения. Для этого

удобно выделить в исходной системе уравнений движения основные безразмерные комплексы – число Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \tag{5.7}$$

и газовое число Грасгофа:

$$Gr = \frac{q}{60} \frac{gh^3}{v^3 \delta_1} \left(1 - \frac{\rho_{met}}{\rho_0} \right) \approx \frac{gh^3}{v^2} \left(1 - \frac{\rho_{min}}{\rho_0} \right),$$
(5.8)

где ρ_{met} – плотность метана, кг/м³; ρ_{min} – минимальная плотность газовоздушной смеси в домене, кг/м³.

Газовое число Грасгофа введено таким образом, чтобы по его величине можно было судить об интенсивности газовыделения, характеризующейся соответствующей размерной величиной q. Безразмерные комплексы чисел Рейнольдса и Грасгофа введены для случая, когда характерная длина равна h, а характерное время равно h^2/v .

Изолинии дальности распространения газового скопления представлены в осях, соответствующих двум основным безразмерным комплексам задачи – Re и Gr (см. рис. 5.10).



Рисунок 5.10 – Изолинии дальности распространения газового скопления от забоя горной выработки в фазовой плоскости размерных параметров V-q

Если задаться некоторой предельно-допустимой дальностью распространения газового скопления от забоя горной выработки E_{max} , то на основании полученных данных

численного моделирования можно построить аппроксимирующую зависимость между числами Re и Gr. В этом случае обычно более удобным бывает выразить число Re как функцию числа Gr – тем самым по заданной интенсивности газовыделения можно будет определить минимальную скорость воздуха, которую надо обеспечить в горной выработке для недопущения распространения газового скопления за пределы небольшой области у груди забоя. Аппроксимирующая зависимость имеет следующий вид:

$$\frac{8.02 \cdot 10^{-16} Gr}{Re^{1.173}} + \frac{1.055}{Re^{0.366}} = \frac{E_{max}}{h}.$$
(5.9)

Данная аппроксимирующая зависимость является трансцендентной относительно переменной Re и не может быть решена точно с помощью аналитических методов. В ситуации малости первого члена слева в (5.9), можно получить приближенное выражение для Re (Gr, E_{max}):

$$Re = \frac{1.15 \cdot 10^5}{\left(\frac{E_{max}}{h} - 6.74 \cdot 10^{-16} \cdot Gr\left(\frac{E_{max}}{h}\right)^{3.2}\right)^{2.73}}.$$
(5.10)

В исследованной области параметров задачи дальность распространения газового скопления всегда выше 3 м – это справедливо только для выбранного значения отставания конца вентиляционного трубопровода от тупикового забоя (2 м), т.е в 1,5 раза превышает расстояние от груди забоя до всаса трубопровода. При уменьшении отставания конца трубопровода минимальное значение дальности распространения газового скопления также уменьшится.

Полученные решения модельной задачи показали сложности движения воздуха даже в пустой и невозмущаемой ничем тупиковой выработке. Стала абсолютно ясна необходимость трехмерного рассмотрения полной задачи.

Заметим, что основными свойствами, которые необходимо учитывать при моделировании газовой обстановки, являются плотность газов по отношению к воздуху. Плотность метана по отношению к воздуху составляет 0,554, что обусловливает возможность его скопления под кровлей горной выработки при недостаточных скоростях воздушных потоков. Сероводород, напротив, несколько тяжелее воздуха, плотность газа по отношению к воздуху 1,19.

Кроме того, газы по-разному растворяются в воде. Сероводород хорошо растворим, в одном литре воды может раствориться 2,5 л газа, метан практически не растворятся в воде, в одном литре воды при нормальном атмосферном давлении и температуре 20 ⁰C растворяется всего 0,035 л газа [9]. Для расчетов динамики метана или сероводорода в тупиковой комбайновой выработке нами была использована ранее разработанная математическая модель тупиковой комбайновой выработки с размещенным в ней комбайновым комплексом.

Поскольку рассматриваемые газы имеют различные плотности, можно предположить, что наиболее сложными условиями будут являться: для метана горная выработка, имеющая наклон 12⁰ вверх, а для расчета распределения сероводорода - горная выработка с уклоном 12⁰ вниз. Выбор угла 12⁰ обусловлен технической возможностью комбайна.

Данное утверждения справедливо, если рассматривается нагнетательный способ проветривания, когда газ, разбавленный до безопасных концентраций, движется по горной выработке. При всасывающем способе, когда поток свежего воздуха движется в сторону забоя выработки, необходимо собрать газ у всаса вентилятора.

Наиболее сложные условия могут оказаться другими, в связи с этим расчеты произведены для условий как наклонных (верх и вниз) и горизонтальных выработок.

С использованием данных газовоздушных съемок для численного эксперимента заданы условия, характерные для действующего рудника СКРУ-З ПАО «Уралкалий», в частности: ожидаемый дебит выделения метана 0,333 м³/мин, ожидаемый дебит выделения сероводорода 0,00301 м³/мин, при этом выделение газа происходит из-за оградительного щита комбайна. Место всаса расположено в 0,5 м от щита комбайна. Производительность всасывающего вентилятора:

- 1,12 м³/с (такое количество воздуха требуется для разбавления выделяющегося метана до безопасных концентраций в соответствии с методикой расчета требуемого количества воздуха);
- 1,57 м³/с (такое количество воздуха требуется для проветривания выработки по минимальной скорости воздуха);

—3,12 м³/с (производительность штатного вентилятора пылеотсоса);

—4,68 м³/с (производительность пылеотсоса, увеличенная в 1,5 раза).

Расчет распределения метана. Горная выработка горизонтальная.

Предполагается, что метан, выделяющийся при разрушении массива и вскрытия микротрещин исполнительным органом комбайна, перемешивается в защитовом пространстве и выделяется в призабойную часть рабочей зоны через щели по периметру щита. На рисунке 5.11 представлена визуализация результатов расчета распространения метана в горизонтальной горной выработке при минимальном расходе воздуха (1,12 м³/с), продольный разрез.



Рисунок 5.11 – Визуализация результатов расчета распространения метана в горизонтальной горной выработке при минимальном расходе воздуха (1,12 м³/с)

Результаты вычислений показали следующий результат. При минимальном расходе воздуха скорости его движения по направлению к забою настолько малы, что метан из-за сил плавучести стратифицируется по высоте и распространяется против основной струи воздуха на небольшое расстояние. При больших расходах воздуха динамические силы превосходят силы плавучести и эффект слабеет, а затем исчезает. Подчеркнем, что при всех реальных расходах воздуха стратификации метана не наблюдается. Значит она может наблюдаться только при выключенной вентиляции.

На рисунке 5.12 представлены детализированные результаты расчета при различных производительностях всасывающего вентилятора.



Рисунок 5.12 – Визуализация результатов расчета распределения метана в горизонтальной выработке при различных производительностях всасывающего вентилятора

Результаты вычислений показывают, что, во-первых, влияние работающего оборудования недостаточно для активного вихревого перемешивания метана, во-вторых, при малой производительности вентилятора (1,12 м³/с) метан может распространяться под

кровлей выработки в сторону устья выработки (в нашем случае до границы расчетной области). Необходимо учесть, что в данном случае силы плавучести от нагретого оборудования и силы плавучести от легкости метана складываются, причем на расстоянии до 4 х метров от забоя наблюдается неравномерность скопления метана (вероятно, сказывается влияние электродвигателей). Далее стратификация метана становится более равномерной. Загазованный воздух с небольшой концентрацией метана скапливается в верхней части горной выработки. Свежий воздух поступает к забою по почве. Думается, что реальная нестационарность потоков полностью перемешает загрязненный метаном воздух с менее загрязненным.

С увеличением производительности вентилятора до 1,57 м³/с картина качественно не меняется. Метан также продолжает распространяться против основного потока воздуха до границы расчетной области, однако его концентрация существенно ниже. Стоит отметить, производительность вентилятора 1,57 м³/с соответствует значению минимально допустимой скорости воздуха, однако, как показывают расчеты, эта скорость не является гарантией отсутствия стратификации метана под кровлей.

Увеличение производительности до 3,12 м³/с несколько меняет общую картину. Метан продолжает распространяться в сторону от забоя, но область распространения начинает локализовываться и ограничивается семью метрами.

Производительность вентилятора 4,68 м³/с (что соответствует 0,3 м/с в основной части горной выработки) практически позволяет избежать распространения метана в горной выработке. Выделяющийся газ локализуется в призабойной части и удаляется по вентиляционному ставу (рис. 5.13).



Рисунок 5.13 – Визуализация результатов расчета распространения метана в горизонтальной горной выработке при расходе воздуха в 4,68 м³/с

На рисунке 5.11 можно увидеть что, несмотря на то, что забор воздуха, всасывающим вентилятором происходит на расстоянии 0,5 м от щита ограждения

комбайна, метан в верхней части выработки распространяется на расстояние порядка 10 м по длине добычной камеры, т. е. фактически против основного потока воздуха.

Причиной этого является соотношение значений скорости воздушных потоков и тепловой депрессии, возникающей при нагреве и обдуве электродвигателей комбайна. Если скорость воздуха недостаточна (а в данном случае она меньше минимально допустимой), то за счет конвективных потоков формируется структура воздушных струй, при которой теплый воздух может подниматься к кровле горной выработки и распространяться на некоторое расстояние навстречу потоку.

Таким образом, расчеты показывают зависимость распространения метана от количества подаваемого воздуха, что позволяет сделать вывод о принципиальной возможности применения всасывающего способа проветривания в условиях газового калийного рудника при подаче достаточного количества свежего воздуха.

Расчет распределения метана. Горная выработка с уклоном вверх

Рассмотрим случай, когда выработка имеет уклон 12⁰ вверх. Предполагается, что метан, выделяющийся при разрушении массива и вскрытия микротрещин исполнительным органом комбайна, перемешивается в защитовом пространстве и выделяется в призабойную часть рабочей зоны через щели по периметру щита. Уклон горной выработки вверх должен способствовать тому, что под влиянием естественной конвекции метан будет стремиться выйти из выработки.

На рисунке 5.14 представлена визуализация результатов расчетов распределения метана в наклонной выработке при минимальной производительности вентилятора (1,12 м³/с).



Рисунок 5.14 – визуализация результатов расчетов распределения метана в выработке с уклоном вверх при минимальной производительности вентилятора (1,12 м³/с)

Результаты, представленные на рисунке 5.14, показывают, что естественная конвекция ограничивает зону распространения метана против основного потока до 7–8 м даже при минимальных расходах воздуха. При этом максимальная локализация газа в

призабойной части выработки происходит при производительности всасывающего вентилятора 4,68 м³/с (рис. 5.15).



Рисунок 5.15 – Сравнение результатов распространения метана в наклонной выработке (12⁰ вверх)

Расчет распределения метана. Горная выработка с уклоном вниз

Расчёты для выработки, имеющей уклон вниз, показывают качественно схожую картину с горизонтальной выработкой с той лишь разницей, что силы естественной конвекции усиливают скорость распространения метана, в результате чего возрастает турбулентность и не наблюдается такая строгая стратификация как в случае с горизонтальной выработкой (рис. 5.16).





Кроме того, естественная конвекция, усиливающая скорость распространения метана под кровлей выработки, является причиной меньшей концентрации газа, что хорошо видно на рисунке 5.17.



Рисунок 5.17 – Сравнение результатов расчета в горизонтальной и наклонной (12⁰ вниз) выработках

При скоростях воздуха 0,2 м/с отличия между горизонтальной и наклонной выработками практически исчезают. При скорости воздуха в основной части выработки 0,3 м/с следы метана фиксируются лишь на незначительном расстоянии от оградительного щита. Это позволяет сделать вывод о возможности безопасного применения всасывающего способа проветривания в условиях выделения метана.

Расчет динамики сероводорода при производительности всасывающего вентилятора 1,12 м³/с (по аналогии с расчетом распределения метана)

В отличие от метана сероводород тяжелее воздуха, что будет сказываться на динамике его распространения в рабочей зоне. По данным газо-воздушных съемок на рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей концентрации сероводорода могут приближаться к значениям ПДК, однако количество выделяющегося газа значительно меньше, чем метана (0,0301 м³/мин H₂S против 0,333 м³/мин CH₄).

На рисунке 5.18 рассмотрено сравнение распределения сероводорода в горизонтальной выработке и выработке с уклоном вниз. На рисунке 5.19. представлена визуализация результатов расчета распределения сероводорода на расстоянии 0,5 м от оградительного щита (т. е. на уровне размещения всасывающего вентилятора). Производительность вентилятора составляет 1,12 м³/с, а) горизонтальная выработка, б) наклонная выработка.



Рисунок 5.18 – Визуализация результатов расчета распределения сероводорода на расстоянии 0,5 м от оградительного щита, а) горизонтальная выработка, б) наклонная выработка

На рисунке 5.18 можно увидеть, что в обоих случаях зоны скопления сероводорода формируются преимущественно у почвы горной выработки. При этом в выработке, имеющей уклон вниз, концентрация сероводорода (в приведенном сечении) более высокая (0,003%) и превышает предельно допустимую (0,00071 %), что не удивительно, поскольку количество воздуха, подаваемого на проветривание (в данном расчете), недостаточно для разбавления сероводорода до безопасных концентраций.

Однако если рассматривать распределение сероводорода в сечениях на расстоянии 1 м, 2 м и 3 м от оградительного щита (рис 5.19), то можно отметить, что благодаря всасывающему способу проветривания (даже с учетом количества воздуха, недостаточного для разбавления газа до безопасных концентраций) происходит его локализация, что неудивительно, т.к. в количественном выражении сероводорода выделяется существенно меньше, чем метана. По этой причине уже на расстоянии двух метров от оградительного цита не фиксируются сколь-нибудь значимые концентрации газа. На расстоянии 6 м (зона нахождения кабины машиниста комбайна) газ отсутствует как в горизонтальной, так и в наклонной выработке. Участки, где наблюдается сероводород, находятся вне областей нахождения машиниста комбайна. Машинист самоходного вагона и вовсе работает в атмосфере с гарантированным отсутствием вредных примесей.



Рисунок 5.19 – Распределение сероводорода в сечениях на расстоянии 1м, 2м и 3м от оградительного щита. а) горизонтальная выработка, б) наклонная выработка

Результаты моделирования с увеличением производительности всасывающего вентилятора с 1,12 м³/с до 4,68 м³/с (рис. 5.20) показывают еще большую степень локализации. Сероводород локализуется в призабойной части на расстоянии, не превышающем одного метра от оградительного щита.



Рисунок 5.20 – Распределение сероводорода в сечениях на расстоянии 1 м, 2 м и 3 м от оградительного щита при производительности всасывающего вентилятора
Количество воздуха, необходимое для разбавления данного количества сероводорода до безопасных концентраций согласно методике расчета требуемого количества воздуха [129] составляет 425 м³/мин (7,08 м³/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.

Если провести сравнение эффективности всасывающего и нагнетательного способов проветривания, то можно отметить следующие аспекты. При проветривании тупиковой выработки, в которой присутствуют горючие газы, интенсивное перемешивание в забое при использовании нагнетательного способа проветривания, является более желательным. Это наглядно можно увидеть на рисунке 5.21. Количество воздуха, подаваемого на проветривание, составляло 1,57 м³/ с, что является достаточным (в соответствии с расчетом требуемого количества воздуха) для обеспечения минимально допустимой скорости воздуха и больше, чем требуется для разбавления выделяющегося метана до безопасных концентраций.



Рисунок 5.21 – Визуализация результатов расчета распределения метана при всасывающем и нагнетательном способах проветривания на расстоянии 0,5 м, 1 м, 2 м, и 15 м от щита комбайна

Результаты расчета показывают, что при одинаковом количестве воздуха, подаваемом на проветривание, нагнетательный способ однозначно позволяет избежать локальных скоплений метана при подаче количества воздуха по фактору «минимально допустимая скорость проветривания».

В то же время, при всасывающем способе также можно избежать локальных скоплений, но для этого потребуется скорость воздуха в основной части выработки не менее 0,3 м/с. (т.е. примерно в 2 раза больше).

В случае выделения в забое ядовитых и физиологически вредных примесей, какими являются соляная пыль и сероводород, при отсутствии технической возможности разбавления их до безопасных концентраций (на практике как раз складывается подобная ситуация) интенсивное перемешивание приводит к поступлению данных вредностей в зону дыхания горнорабочих. В этом случае эффективным является локализация данных вредностей вне зоны дыхания рабочих с последующим удалением их по воздуховоду, что позволяет обеспечить всасывающий способ проветривания.

В случае, когда выделяются и взрывоопасные и физиологически опасные примеси имеет место (в рамках численного моделирования) некоторое противоречие: с одной стороны необходимо интенсивное перемешивание, с другой локализация.

Анализируя результаты численного моделирования, представленные выше, можно сделать вывод, что наиболее рациональным и эффективным решением данной задачи является применение всасывающего способа проветривания с обеспечением соответствующей скорости воздуха. Кроме того, можно использовать небольших дополнительные источники тяги в призабойном пространстве, повышающие степень турбулентности воздуха. На практике, по нашему мнению, вращения режущего органа комбайна, которое невозможно учесть в рамках стационарной задачи и циклическое движение самоходного вагона не дадут образоваться ни застойным зонам, ни слоевым скоплениям.

Рассмотрим реальную ситуацию на руднике СКРУ-3 ПАО «Уралкалий». В проходческо-очистном комбайновом забое пласта АБ выделяется метан в количестве 0,333 м³/мин, и сероводород в количестве 0,00301 м³/мин (данные газовоздушной съемки). Количественно сероводорода выделяется значительно меньше, но его ПДК существенно жёстче 0,0071 % против 0,5 % ПДК метана по объему. Расчетное количество воздуха, требуемое для проветривания выработки по фактору горючие и взрывоопасные газы составляет 1,12 м³/с, по фактору ядовитые газы 7,08 м³/с.

Таким образом, проветривание забоя должно осуществляться по наибольшему фактору, т. е. по ядовитым газам (7,08 м³/с). Однако рассматривая результаты моделирования с применением всасывающего способа проветривания, мы видим, что при подаче в забой 4,68 м³/с удается локализовать сероводород, и в то же время этого количества воздуха достаточно для недопущения формирования скоплений метана.

182

Таким образом, нагнетательный способ проветривания эффективен лишь в том случае, если выделяется (и в значительных количествах) единственной тип вредности – метан с незначительным пылеобразованием, однако это технологически невозможно в условиях калийного рудника. В любом случае разрушение сильвинитового пласта существующими добычными комбайнами, происходящее в условиях низкой относительной влажности воздуха, сопровождается выделением большого количества пыли. В главе 4 показано, что нормализация пылевой обстановки при помощи увеличения количества подаваемого воздуха (при нагнетательном способе проветривания) не дает результатов.

Решить задачу нормализации атмосферы в добычном забое калийного рудника по газовому и по пылевому факторам в комплексе позволяет лишь всасывающий способ проветривания.

5.4 Выводы

- Работа двигателей комбайна и их систем охлаждения создает в призабойной части восходящие конвективные потоки, увеличивающие турбулентность воздушных масс в забое. При ничтожно малых скоростях воздуха, поступающего на проветривание, данной турбулентности недостаточно для недопущения формирования вертикальной стратификации метана.
- Вертикальная стратификация и распространение метана против основного потока воздуха как в горизонтальных, так и в наклонных выработках может наблюдаться только в случае, когда силы плавучести метана оказываются больше импульса воздушной струи, двигающейся по выработке.
- 3. Устранение эффекта вертикальной стратификации метана (и, как следствие, возможных слоевых скоплений) требует подбора необходимых скоростей воздуха в горной выработке, определяемых в зависимости от интенсивности газовыделения, что делает применение всасывающего способа проветривания безопасным.
- Применение всасывающего способа проветривания тупиковых выработок калийных рудников в условиях газового рудника целесообразно использовать в случае выделения в атмосферу выработки ядовитых и физиологически вредных примесей.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СОЛЯНОЙ ПЫЛИ ПРИ СЕЛЕКТИВНОЙ ВЫЕМКЕ КАЛИЙНОЙ РУДЫ В ДЛИННЫХ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ (ЛАВАХ)

6.1 Анализ процессов воздухораспределения и пылеобразования в длинных очистных забоях (лавах)

Применение столбовой системы разработки с добычей руды в длинных очистных забоях (лавах) характерно для Старобинского месторождения калийных солей, что обусловлено геологическим строением и отсутствием опасности нарушения водозащитной тощи.

Классификация технологических схем столбовой системы разработки, применяемой на Старобинском месторождении, довольно обширна и включает в себя десять разновидностей схем [41]. Эти схемы принципиально можно разделить на «валовые» и «селективные». Валовая очистная выемка производится без выделения прослоек породы, а при селективной выемке – породные прослойки и полезное ископаемое вынимаются раздельно, а затем породные (глинисто-галитовые слои) закладываются в выработанное пространство при помощи роторного метателя рис. 6.1.



Рисунок 6.1 – Установка механической закладки (роторный метатель)

Именно при использовании селективной выемки полезного ископаемого наблюдается наиболее сложная пылевая обстановка.

Добыча руды в этом случае производится очистными комбайнами различных модификаций типа SL производства фирмы *Eickhoff* и комбайнами Электра [165].

Важнейшей особенностью технологического процесса селективной выемки является не только то, что слои глинисто-соляной породы вынимаются отдельно, а то, что, вынимая порода не транспортируется на поверхность, а при помощи установок механической закладки (УМЗ) забрасывается в выработанное пространство на значительное расстояние (10–15 м). Такой процесс складирования глинисто-галитового слоя сопровождается интенсивным выделением пыли, которая суммируется с пылью, образующейся при разрушении горного массива исполнительным органом комбайна. При этом поток глинисто-солевой породы увлекает за собой большое количество воздуха – возникает эжекционный эффект [55, 4, 30]. Сила эжекции такова, что на отдельных участках лавы при работе установок механической закладки происходит опрокидывание струи воздуха, сопровождающееся образованием частично зацикленных контуров запыленного воздуха.

Поэтому решение задачи о нормализации пылевой обстановки при селективной выемке полезного ископаемое в длинных очистных забоях (лавах) необходимо совмещает и рассмотрение проветривания и в отдельных выработках, и в их системе.

Схема движения воздушных потоков в селективной лаве зависит от режима работы лавы. При выемке сильвинитового слоя в лаве фиксируется движение воздуха в соответствие с проектом (рис. 6.2). Свежий воздух поступает по трем штрекам (конвейерному, транспортному и закладочному штреку №2). Для удаления отработанного воздуха используется закладочный штрек № 1. Вентиляционный штрек лавы перекрыт в связи с технологическими особенностями данного участка.



Рисунок 6.2 – Схема движения воздушных потоков при выемке сильвинитового слоя в селективной лаве № 1 гор. -220м

Ситуация меняется при выемке глинисто-галитового слоя и включения в работу установок механической закладки. В рабочей зоне лавы расположены четыре установки механической закладки:

— № 1 на конвейерном штреке лавы;

— № 2 на первом закладочном штреке;

— № 3 на втором закладочном штреке;

— № 4 на транспортном штреке.

Под действием общешахтной депрессии и депрессии, создаваемой дополнительными источниками тяги, свежий воздух поступает по транспортному штреку к месту сопряжения штрека и лавы, где попадает в зону разрежения, созданную установкой механической закладки №4. Под действием этого разрежения свежий воздух засасывается в закрепное пространство.

Далее пылевоздушный поток движется вдоль секций крепи (в свободной части выработанного пространства) и на расстоянии примерно 30–40 м от места сопряжения лавы и транспортного штрека поступает в рабочее пространство лавы (рис. 6.4). Пылевоздушная смесь в лаву поступает через свободное пространство между секциями крепи, которое в данной лаве достигает 20–40 см. Попадая в рабочее пространство лавы, поток воздуха раздваивается. Большая часть начинает двигаться по направлению к транспортному штреку (направление, обратное проектному). Скорость воздуха в этом случае на участке «В» может достигать 1,3 м/с. Тогда как на участке «А» - всего 0,38 м/с. Такая ситуация приводит к тому, что концентрация пыли на участке «В» достигает 1600 мг/м³ (320 ПДК) (рис. 6.3).



Рисунок 6.3 – Схема образования первого воздушного контура в лаве

Таким образом работа установок механической закладки активно влияет на формирование пылевой обстановки по всей длине рабочей зоны.

Рассмотрим две ситуации. Первая - комбайн начинает движение от конвейерного штрека по направлению к транспортному (находится между конвейерным и первым закладочным (вентиляционным)). Работают установки механической закладки № 2, № 3, № 4. В этом случае зона интенсивной запыленности образуется в районе работающих

установок механической закладки и движется по направлению движения воздушной струи (рис. 6.4).



Рисунок 6.4 – Формирование пылевоздушных потоков при выемке глинисто-галитового слоя

В этом случае, пока комбайн движется от конвейерного штрека к первому закладочному (вентиляционному), машинист комбайна находится в относительно незапыленной области, поскольку основные пылевые потоки, возникающие в результате работы закладочных установок № 2, № 3, № 4, движутся по лаве до вентиляционного штрека и удаляются из рабочей зоны.

Вторая ситуация - пересечение комбайном оси вентиляционного штрека (в данном случае его роль играет первый закладочный штрек), (рис. 6.5). После пересечения закладочного штрека № 1 комбайн начинает двигаться навстречу вентиляционному потоку, а поскольку закладочные установи № 2, № 3, № 4 продолжают работать, он попадает в зону интенсивной запыленности, концентрация пыли в которой достигает 2400 мг/м³ (480 ПДК).



глинисто-галитового слоя

6.2 Экспериментальные исследования пылевой обстановки в лаве, ведущей селективную выемку

Для получения полной картины движения пылевоздушных потоков при различных режимах работы оборудования нами были проведены измерения концентрации пыли в воздушной среде лавы. Замеры проводились на протяжении полного цикла работы оборудования, как при выемке сильвинитового слоя, так и породного – глинисто-галитового.

Для этого, начиная с конвейерного штрека и далее по длине лавы были выбраны 7 точек (рис. 6.6), в которых проводились замеры концентрации пыли, относительной влажности воздуха и температуры. По условиям обследования замер в точке производился в момент нахождения рядом с ней работающего комбайна (за исключением точек 1 и 7, расположенных на конвейерном и транспортном штреках). Результаты замеров приведены в таблицах 6.1–6.2.



Рисунок 6.6 – Схема расположения точек замеров

Точка проведения замера	№ фильтра	Запыленность, мг/м ³	Среднее значение запыленности, мг/м ³	Максимальное значение запыленности, мг/м ³	Число ПДК, мг/м ³	Температура воздуха, ⁰ С	Относительная влажность воздуха, %
Точка №1	1	12,3;					
(до включения	2	8,2;	10,9	12,3	2,5	23	44
конвейера)	3	12,3					
	13	209,2					
Точка № 2	14	132,7	173,5	209,2	42	22	46
	15	178,6					
	10	207,1					
Точка №3	11	237,4	232,3	252,5	51	19	49
	12	252,5					
	7	313,1					
Точка №4	8	323,2	294,6	323,2	65	19	50
	9	247,5					
	4	2258,9					
Точка №5	5	2066,0	2106,6	2258,9	452	20	47
	6	1994,9					
	28	399,0					
Точка №6	29	393,9	373,7	399,0	80	19	46
	30	328,3					

Таблица 6.1— Результаты замеров концентрации пыли и микроклиматических параметров при выемке сильвинитового слоя

Точка проведения замера	№ фильтра	Запыленность, мг/м ³	Среднее значение запыленности, мг/м ³	Максимальное значение запыленности, мг/м ³ Число ПДК, мг/м ³		Температура воздуха, ⁰ С	Относительная влажность воздуха, %	
Точка № 1	31	38,9						
(при работающем	32	24,6	28,7	38,9	8	23	44	
конвейере)	33	22,5						
	16	173,5						
Точка № 2	17	173,5	163,3	173,5	35	22	46	
	18	142,9						
	19	2075,8						
Точка № 3	20	1787,9	1816,5	2075,8	415	19	49	
	21	1585,9						
	22	388,9						
Точка № 4	23	318,2	338,4	388,9	78	19	50	
	24	308,1						
	25	2264,0						
Точка № 5	26	2680,2	2478,9	2680,2	536	20	47	
	27	2492,4						
	28	1627,6						
Точка № б	29	1481,1	1403	1627	325	19	46	
	30	1100,3						

Таблица 6.2 — Результаты замеров концентрации пыли и микроклиматических параметров при выемке глинисто-галитового слоя

При выемке сильвинитового слоя (комбайн двигался от транспортного штрека к конвейерному) наибольшая средняя концентрация пыли - 2106,6 мг/м³, максимальная – 2258,9 мг/м³ зафиксирована в точке № 5 (между транспортным штреком и закладочным штреком № 2). В точке №4 средняя концентрация взвешенного аэрозоля уже значительно ниже 294,6 мг/м³, максимальная - 323,2 мг/м³. Этот факт легко объясним.

В технологической сбойке между транспортным штреком лавы и закладочным штреком № 2 сломаны вентиляционные ворота и воздух в лаву поступает не только по транспортному штреку, но и по закладочному штреку № 2. Общее количество воздуха, поступающего в лаву, не меняется, однако скорость воздуха в лаве на участке между транспортным штреком и закладочным штреком № 2 почти в 2 раза ниже, чем на остальных участках лавы, что негативно сказывается на выносе пыли. В момент замера в точке №4 комбайн уже пересек ось закладочного штрека № 2 и находился в зоне слияния двух потоков. Скорость воздуха возросла до 0,7–0,8 м/с и вынос пыли стал более интенсивным. Концентрация пыли в точке № 3 находится примерно на том же уровне что и в точке № 4, поскольку условия замера идентичны. Средняя концентрация пыли в точке № 2 несколько ниже, чем в остальных случаях, и составляет 173,5 мг/м³. Эти данные недостаточно корректны, поскольку по техническим причинам измерение проводилось частично на свежей струе (комбайн пересек ось закладочного штрека № 2), являющегося вентиляционным.)

Замеры концентрации пыли при выемке породного слоя проводились при следующих условиях:

— замер в точке № 2 - работают метатели № 2, № 3, № 4;

— замер в точке № 3–№ 5 - работают метатели № 3, № 4;

— замер в точке № 6 - работают метатели № 1, № 2.

Можно заметить, что выемка глинисто-галитового слоя характеризуется более высокими концентрациями пыли в атмосфере рабочей зоны. Как уже было сказано выше, это связано с работой установок механической закладки, которые являются мощными источниками пылеобразования. Концентрация пыли колеблется по длине лавы в широких пределах от 163,3 мг/м³ в точке № 2 до 2478,9 мг/м³ в точке № 5 (показаны средние значения).

Из общего пылевого фона ярко выделяются две зоны, в которых концентрация пыли составляет около 2000 мг/м³. Район точки № 3 – средняя концентрация пыли составляет 1816,5 мг/м³ (максимальная – 2075,8 мг/м³), и район точки № 5, где средняя концентрация составляет 2106,6 мг/м³ (максимальная – 2558,9 мг/м³). Данные «экстремумы» концентрации пыли приходятся как раз на области, в которых зафиксированы частично замкнутые контуры воздуха. На рисунке 6.7 приведено сравнение концентрации пыли в лаве при выемке сильвинитового и породного слоев.



Рисунок 6.7 – Сравнение концентрации пыли в лаве при выемке сильвинитового и породного слоев

Проведенные исследования подтверждают предположение, что воздушные контуры, образующиеся в результате работы установок механической закладки, самым негативным образом влияют на концентрацию пыли в рабочей зоне. Кроме того, схема движения воздушных потоков в пределах первой панели не соответствует первоначальному проекту. Центральный вентиляционный штрек лавы перекрыт наглухо и тем самым исключен из схемы проветривания участка. Исходящая струя удаляется из лавы по закладочному штреку № 1. Закладочный штрек № 2 участвует в схеме проветривания участка.

Для уменьшения запыленности в рабочем пространстве лавы необходимо использовать для удаления исходящего из лавы воздуха центральный вентиляционный штрек (при условии достижения примерно равной подачи воздуха с транспортного и конвейерного штреков), а также изменить режим работы закладочного оборудования следующим образом: комбайн начинает движение от конвейерного штрека. До момента пересечения комбайном центрального вентиляционного штрека должны работать установки механической закладки № 3 и № 4, расположенные на закладочном штреке № 2 и транспортном штреке соответственно. В момент пересечения комбайном оси центрального вентиляционного штрека конвейер в лаве реверсируется, метательные установки № 3 и № 4 отключаются, начинают работать метательные установки № 1 и № 2.

Использование только вентиляции как способа борьбы с пылью не решит полностью проблему повышенной запыленности в рабочей зоне лавы. Но при данной схеме работы

оборудования машинист комбайна и помощник машиниста комбайна не попадают в зону запыленности, создаваемую установками механической закладки.

Для дальнейшего снижения запыленности воздуха целесообразно исследовать дополнительные меры пылеподавления.

6.3 Разработка технических решений по снижению концентрации пыли в рабочей зоне лавы, ведущей селективную выемку

На основании результатов исследований была разработана система пылеподавления для условий селективной выемки руды. Получение максимального эффекта от применения данной системы возможно при выполнении ряда условий, которые можно отнести к вентиляционным методам.

Первое - организация проветривания лавы - минимизировать эжекционный эффект и образование воздушных контуров установками механической закладки.

Второе - скоростной режим проветривания лавы должен быть таким, чтобы предотвращать возможность подъема осевшей пыли и, в то же время, обеспечивать максимальный вынос ее из лавы.

Для решения данной задачи была создана математическая модель движения воздушных потоков в лаве, учитывающая наличие установок механической закладки. Установки механической закладки в данном случае введены в модель как дополнительные источники тяги, расположенные в рабочей зоне. Их аэродинамические и напорные характеристики подбирались таким образом, чтобы воздушные потоки полностью соответствовали реальным, замеренным в ходе проведения натурных исследований. Расстояния между секциями механизированной крепи задавались как вентиляционные окна. Для упрощения модели они объединены в два окна с соответствующими параметрами. На рисунке 6.8 изображен фрагмент схемы математической модели вентиляционной сети селективной лавы.

194



Рисунок 6.8 – Фрагмент схемы математической модели вентиляционной сети селективной лавы

Ветви № 60, № 62, 65, № 66 представляют собой аэродинамический эквивалент расстояний между секциями крепи, через которые происходит поступление пылевоздушной смеси в рабочее пространство лавы. Ветви № 46 и № 45 — это участок лавы между транспортным штреком (ветвь - № 37) и вторым закладочным штреком (ветвь -№ 38), на котором воздух движется в обратном направлении. Ветвь № 48 - участок лавы между центральным вентиляционным штреком (ветвь - № 38) и вторым закладочным штреком, где воздух также идет в обратном направлении.

Предварительный анализ схемы показывает, что устранения воздушных контуров, возникающих в результате работы УМЗ, легче всего было бы добиться, перекрыв ветви № 63 и № 61 в первом и втором контурах соответственно. На практике это соответствует устранению эффекта эжектирования воздуха движущимся потоком породы (выбрасываемым УМЗ), либо полной воздушной изоляции «метателя». К сожалению, первый вариант невозможен на основании физических законов, а второй неосуществим по технологическим причинам (к метателям необходим постоянный доступ рабочих).

Избавиться от негативного воздействия воздушных контуров и одновременно уменьшить поступление в рабочую зону лавы пыли, образующейся в процессе закладки глинисто-галитового слоя, возможно также перекрыв ветви № 66, 65 и № 60, 62. На практике это соответствует минимизации расстояний между секциями механизированной крепи. Такое мероприятие вполне осуществимо.

В случае монтажа новой лавы необходимо заранее устанавливать секции крепи как можно ближе друг к другу. В условиях уже работающей лавы необходимо предусмотреть защитные «фартуки», закрывающие пространство между секциями крепи. Поскольку лава уже работает и крепление защитных фартуков с внешней стороны крепи невозможно, их необходимо устанавливать с внутренней стороны секций крепи. Материалом может служить плотный брезент, либо конвейерная лента. В этом случае необходимо разработать крепление защитных «фартуков», которое позволяло бы свободно передвигать секции крепи без повреждения защиты. Очевидно, что при выполнении предложенных мероприятий не удастся полностью ликвидировать проемы между секциями крепи. Однако это мероприятие позволит значительно снизить выброс пылевоздушной смеси в рабочую зону лавы, а также существенно осложнит условия образования воздушных контуров.

В результате дальнейшего анализа схемы движения воздушных потоков в лаве оказалось, что воздушный контур № 1 имеет меньшие размеры по сравнению с контуром № 2. Причиной этого является тот факт, что количество воздуха, проходящего по лаве на участке между транспортным штреком и вторым закладочным штреком (контур № 2), почти в два раза меньше, чем на участке, где зафиксирован контур № 1. Это, в свою очередь, связано с тем, что количество свежего воздуха, которое должно поступать в лаву по транспортному штреку, в нарушение проекта делится между транспортным штреком и закладочным штреком № 2–308 и 277 м³/мин соответственно. На участок контура № 1 воздух поступает уже в количестве 585 м³/мин (~ 600 м³/мин в математической модели) соответственно и размер контура на этом участке меньше. Данный факт дает основание предположить, что увеличение количества воздуха, проходящего по лаве на участках образования воздушных контуров.

Для подтверждения выдвинутого предположения были промоделированы несколько вариантов проветривания лавы № 1. Первый вариант – свежий воздух поступает в лаву, как и положено проектом, по двум выработкам конвейерному и транспортному штрекам (закладочный штрек № 2 перекрыт). В этом случае условия для первого и второго контуров выравниваются, поэтому контур № 2 должен уменьшиться в размерах (и количестве рециркулируемого воздуха). Результаты расчета показывают, что в случае закрытия (для проветривания) закладочного штрека № 2, по транспортному штреку в лаву будет поступать воздух в количестве 580 м³/мин. В результате чего интенсивность контура № 2 уменьшится.

196

Иллюстрацией этого является то, что воздух на участке лавы, соответствующей ветви № 46

(таблица 6.3), изменил направление движения.

Таблица 6.3— Результаты расчета

Ma			Расход
	Выработка	Сопротивление, кмюрг	воздуха,
ветви			куб. м/мин
1	Транс. штрек лавы	0,024015869	577
2	Вент. штрек лавы	0,001891106	710
3	Конвейерный штрек	0,000293249	272
4	Полевая исследовательская выработка	0,001701171	1
5	Полевая исследовательская выработка	100	-6
6	Конв. штрек лавы	0,591193543	108
7	Полевая исследовательская выработка	1000	-2
8	Полевая исследовательская выработка	4,10548E-05	712
9	Полевая исследовательская выработка	0,000165887	-23
10	Полевая исследовательская выработка	8,29433E-05	104
11	Блоковый вент. штрек	0,002488298	15
12	Диагональный штрек2	0,000165887	6
13	Транспортный штрек	0,000439873	37
14	Сбойка	8,29433E-05	32
15	Вент. штрек	0,000159624	35
16	Диагональный штрек2	1000	-2
17	Диагональный штрек2	0,00024883	-8
18	Диагональный штрек2	1000	2
19	Диагональный штрек2	100	-8
20	Вент. штрек лавы	100	4
21	Закладочный штрек №1	0,002380471	714
22	Конв. штрек лавы	0,009474126	118
23	Сбойка	8,29433E-05	3
24	Транспортный штрек	0,000439873	12
25	Вент. штрек	0,002488298	3
26	Транс. штрек лавы	0,003930391	576
27	Вент. штрек лавы	1000	-3
28	Закладочный штрек №1	0,002488298	724
29	Конв. штрек лавы	0,000101508	128
30	Диагональный штрек1	100	-4
31	Диагональный штрек	100	4
32	Диагональный штрек1	100	-9
33	Диагональный штрек1	100	7
34	Диагональный штрек1	100	-8
35	Закладочный штрек №2	0,001430237	7
36	Закладочный штрек №2	0,002488298	9
37	Транс. штрек лавы	0,000244199	580
38	Закладочный штрек №2	0,000489365	1
39	Вент. штрек лавы	0,000489365	-15
40	Закладочный штрек №1	0,000522542	740
41	Конв. штрек лавы	0,123685315	144
42	Транспортный штрек	0,001172995	0

№ ветви	Выработка	Сопротивление, кмюрг	Расход воздуха,
43	Сбойка	8 29/33E-05	Куо. м/мин
-+3 	Reut uitner	0.00663546	0
45	Пава	0.00024618	131
46	Пара	0,00024618	
40	Лава	0.000369269	580
47	Лава	0,000307207	130
40	Лава	0,000147708	225
50	Лава	0.000184635	144
51	Лава	0.00048005	144
52	Лава	0.000184635	144
53	Лава	0.000184635	596
54	Лава	0.000147708	596
55	Вент. штрек	6.79579E-07	849
56	Полевая исследовательская выработка	100	-8
57	Вент. штрек	0,276244656	139
58	Транспортный штрек	0.000586497	164
59		5,43058E-06	356
60	Ветви контура 2	0,022038881	356
61	Ветви контура 2	5,43058E-06	711
62	Ветви контура 2	0,022038881	355
63	Ветви контура 1	2,21749E-06	710
64	Ветви контура 1	2,21749E-06	710
65	Ветви контура 1	0,022041085	355
66	Ветви контура 1	0,022041085	355
67	Ветви контура 1	2,21749E-06	355

* Отрицательное значение расхода означает, что направление движения воздуха противоположно указанному стрелкой на схеме.

На основании результатов расчета можно сделать вывод, что увеличение подачи свежего воздуха (а соответственно и его скорости) в лаву может решить проблему образования воздушных контуров.

Анализ результатов, полученных в процессе математического моделирования различных вариантов проветривания лавы, позволяет сделать ряд выводов. Для выполнения первого условия эффективной борьбы с пылью в селективной лаве – организации проветривания лавы, исключающей образование (либо максимально минимизирующее влияние) воздушных контуров, необходимо выполнение двух мероприятий.

Первое – проветривание лав, осуществляющих селективную выемку полезного ископаемого с использованием установок механической закладки, необходимо осуществлять таким количеством воздуха, чтобы скорость потока в лаве составляла от 1,4 м/с до 2,0 м/с. Эти значения получены экспериментальным путем. Необходимо отметить, что скорость потока воздуха в лаве не должна превышать критической.

Второе – максимальное уплотнение секций механизированной крепи. Его выполнение позволит усложнить условия, способствующие образованию воздушных контуров, и одновременно снизит количество пылевоздушной смеси, попадающей в рабочую зону лавы из выработанного пространства. В случае монтажа новой лавы необходимо заранее устанавливать секции крепи как можно ближе друг к другу. В условиях уже работающей лавы необходимо предусмотреть защитные «фартуки», закрывающие пространство между секциями крепи.

Рассмотрим формирование скоростного режима вентиляционных потоков при проветривании лавы, ведущей селективную выемку, для эффективного разбавления и выноса пылевого аэрозоля (по критерию «критическая скорость»).

Количество воздуха, необходимое для проветривания лав при комбайновом способе отбойки руды по фактору «пыль» определяется по формуле:

$$Q_3 = 60 \times V \pi (S \pi - S m), m^3 / мин$$
 6.1

где Vл – эффективная скорость по выносу пыли, Vл = 0,5 м/с;

Sл – площадь сечения призабойных частей лавы до передвижки крепи, м²,

 $S\pi = 11,1 \text{ m}^2;$

Sм – миделево сечение крепи и скребкового конвейера, M^2 , Sм = 1,9 M^2 [41].

Так как лава работает по схеме с центрально расположенным вентиляционным штреком, по бортовым выработкам необходимо подавать $Q_{\pi} = 276 \times 2 = 552 \text{ м}^3$ /мин.

В этих расчетах ключевым является значение скорости воздуха для эффективного выноса пыли. В инструкции по расчету количества воздуха ее принимают 0,5 м/с. Однако в лаве, проветриваемой количеством воздуха с эффективной скоростью 0,5 м/с, зафиксированы значения запыленности, превышающие ПДК в 100–400 раз. В связи с этим рассмотрен вопрос возможности увеличения значения скорости.

Известно, что скорости движения воздуха, при которых обеспечивается минимальная запыленность атмосферы при данной начальной интенсивности пылеобразования, называются оптимальными. Скорость воздуха, при которой начинается срыв частиц, ранее осевших на почву и стенки выработок, и повышается концентрация пыли в атмосфере, называется критической.

Теоретическому исследованию критических скоростей посвящен ряд работ А.Д. Климанова, Клячко Л.С. [55,57] и др., в которых предлагаются различные формулы для определения критической скорости.

Критическая скорость имеет минимальное значение у частиц размером 0,1 мм [16,61,77,161]. Поскольку аэрогель всегда полидисперсен, для решения практических задач

достаточно знать минимальную критическую скорость, при которой начинают вовлекаться в поток наиболее легко взвешиваемые частицы (d_ч = 0,1 мм). Для частиц с такими размерами критическая скорость может быть найдена по формуле:

$$v_{cp.\kappa p} = 0,033 \cdot \sqrt{\frac{1 + 1,7 \cdot W_{_{6H}}^{1,87}}{\alpha}}.$$
6.2

Для практического использования этой формулы целесообразно заменить внешнюю влажность пыли относительной влажностью воздуха W_в, воспользовавшись эмпирической зависимостью:

$$W_{\rm BH} = 0,0875 \cdot W_{\rm g} - K_{\rm g}, \tag{6.3}$$

где К_в – эмпирический коэффициент (для сильвинитовой пыли К_в = 2,4).

С учетом вышеприведенной зависимости выражение для подсчета критической скорости срыва для сильвинитовой пыли примет вид:

$$v_{cp.\kappa p} = 0,033 \cdot \sqrt{\frac{1,5W_e - 3,1}{\alpha}}.$$
 6.4

Средняя критическая скорость сильвинитовой пыли составляет от 1 до 2 м/с.

Эти данные подтверждаются проведенными экспериментами. Наибольший эффект снижения запыленности происходит при повышении скорости с 0,25 до 0,7–2,0 м/с.



Рисунок 6.9 – Зависимость запыленности воздуха от скорости его движения по горной выработке

На сегодняшний день, при выемке сильвинитового слоя скорость движения воздуха в лаве колеблется от 0,38 м/с до 0,7м/с. На участке между конвейерным штреком лавы и первым

закладочным штреком скорость воздуха составляет ~0,38 м/с, в самом конвейерном штреке 0,2–0,3 м/с.

Увеличение скорости движения воздуха в лаве хорошо согласуется с мероприятием, описанным в разделе 6.3.1. В данном разделе предлагается увеличить скорость потока воздуха для минимизации возможности образования рециркуляционных контуров. Причем диапазон предлагаемых скоростей укладывается в пределы критической скорости (до 2 м/с).

6.4 Разработка эффективного способа борьбы с пылью в атмосфере лавы, осуществляющей селективную выемку

Проведенный выше анализ методов гидрообеспыливания показал, что специфические условия калийного рудника в целом и лав, осуществляющих селективную выемку, в частности, не позволяют применить какую-либо стандартную систему гидрообеспыливания. Тем не менее, сам способ принципиально является весьма эффективным, особенно в условиях гигроскопичного аэрозоля. Поэтому в условиях калийного рудника оправдан перенос мероприятий по осаждению пыли с применением влаги в закрепное пространство, и применение комбинированного метода гидрообеспыливания, включающего в себя конденсационный метод и орошение выбрасываемой горной массы. Суть метода заключается в том, что орошение отбитой горной массы производится не в процессе ее движения по конвейеру, а в момент ее выхода из раструба «метателя». Одновременно происходит увеличение относительной влажности воздуха, что является основным условием конденсационного метода обеспыливания (подробно механизм конденсационного способа обеспыливания описан в работе А.Е. Красноштейна и И.И. Медведева).

Принципиально система орошения состоит из насосной установки с фильтром для очистки воды, компрессорной установки для подачи сжатого воздуха (если необходимо), напорных трубопроводов и форсунок либо туманообразователей [53,170,166,159]. Насосная и компрессорная установки располагаются на транспортном (либо конвейерном) штреке, при помощи гибких трубопроводов соединяются с системой орошения (стандартные форсунки либо туманообразователе), рис. 6.10. - 6.11.



1 - емкость с водой; 2 - компрессор; 3 - насос; 4 - трубопровод; 5 - метатель, с установленными форсунками.



Рисунок 6.10 – Принципиальная компоновка системы гидроорошения

Рисунок 6.11 – Размещение форсунок на метателе

Система должна оснащаться блоком управления, который при включении закладочной установки включал бы подачу воды. В результате факел мелкодиспергированной воды направляется вдоль движения выбрасываемой метателем породы. При этом происходит увеличение относительной влажности воздуха и отсутствует опасность налипания глины на метателя и конвейер. Для орошения может использоваться вода, периодически подвозимая на участок. Следует отметить, что при увлажнении воздуха и выбрасываемой породы снизится концентрация пыли по всей длине рабочей зоны.

Нами на руднике 1 РУ ПАО «Беларуськалий» было проведено испытание системы гидроорошения, предложенной для использования в условиях лавы, ведущей селективную

выемку полезного ископаемого. На рисунке 6.12. представлены точки, в которых производились измерения концентрации пыли.



Рисунок 6.12 – Места замеров параметров воздуха

Результаты замеров параметров воздуха, а конкретно концентрации в нем пылевого аэрозоля в точках 1 и 7, что соответствует транспортному и конвейерному штрекам, характеризуют свежую поступающую в лаву струю воздуха. Замеры в точках 2 и 6 (сопряжения транспортного и конвейерного штреков с забоем лавы в непосредственной близости от «метателей», соответственно №1 и №4) характеризуют воздух, поступающий в лаву, с учетом наличия (отсутствия) воздушных контуров, создаваемых УМЗ №1 и №4. Замеры в точках 3 и 5 (сопряжения закладочных штреков №1 и №2 с забоем лавы в непосредственной близости от «метателей», соответственно №2 и №3) характеризуют воздух, движущийся по лаве с учетом влияния воздушных контуров, создаваемых соответственно УМЗ №1-№2 и №3-№4. Замер в точке 4, что соответствует сопряжению вентиляционного штрека с забоем лавы, характеризуют исходящую из лавы струю воздуха.

Замеры параметров воздуха производили в двух режимах:

— без задействования мероприятий по обеспыливанию;

— после включения системы гидроорошения.

Сравнение результатов позволяет оценить эффективность предложенных мероприятий.

Замеры производились при следующих условиях. Замер в точке производился в момент нахождения рядом с ней работающего комбайна (за исключением точек 1 и 7, расположенных на конвейерном и транспортном штреках). Соблюдение этого условия необходимо для учета всех источников пылеобразования в лаве (УМЗ и комбайн), и регистрации максимальной концентрации пылевого аэрозоля в зоне дыхания машиниста комбайна.

Результаты испытаний.

Испытания системы обеспыливания проводились в два этапа. На первом этапе проводились замеры концентрации пыли в выбранных точках при выключенной системе обеспыливания (результаты представлены в таблице 6.4). На втором этапе замеры проводились при работе системы обеспыливания (результаты представлены в таблице 6.5). В дальнейшем результаты сравнивались между собой.

Точка проведения замера	№ фильтра	Среднее значение запыленности, мг/м ³	Максимальное значение запыленности, мг/м ³	ПДК, мг/м ³	Температура, ⁰ С
Точка № 1 (при работающем конвейере)	31 32 33	28,7	38,9	5	23
Точка № 2	16 17 18	163,3	173,5	5	22
Точка № 3	19 20 21	1816,5	2075,8	5	19
Точка № 4	22 23 24	338,4	388,9	5	19
Точка № 5	25 26 27	2106,6	2258,9	5	20
Точка № б	28 29 30	373,7	399,0	5	19

Таблица 6.4 — Результаты замеров концентрации пыли и микроклиматических параметров при выемке глинисто-галитового слоя (система обеспыливания выключена)

Таблица 6.5— Результаты замеров концентрации пыли и микроклиматических параметров при выемке глинисто-галитового слоя (система обеспыливания включена)

				/	
		Среднее	Максимальное		
Точка проведения	N⁰	значение	значение	ПДК,	Температура,
замера	фильтра	запыленности,	запыленности,	$M\Gamma/M^3$	$^{0}\mathrm{C}$
		мг/м ³	$M\Gamma/M^3$		
Точка № 1	47				
(при работающем	46	28,7	38,9	5	21
конвейере)	45				
	51				
Точка № 2	52	51,2	75,3	5	19
	53				
	55				
Точка № 3	56	1263,5	1342,4	5	18
	57				
Точка № 4	58	98,7	110,2	5	18

		Среднее	Максимальное		
Точка проведения	N⁰	значение	значение	ПДК,	Температура,
замера	фильтра	запыленности,	запыленности,	мг/м ³	$^{0}\mathrm{C}$
		$M\Gamma/M^3$	$M\Gamma/M^3$		
	59				
	60				
	61				
Точка № 5	62	1540,2	1670,3	5	19
	63				
	64				
Точка № б	64	87,4	91,3	5	18
	66				





Сравнение полученных результатов, представленное на рисунке 6.13, показывает, что средняя концентрация пылевого аэрозоля в лаве при выключенной системе обеспыливания составляет 804,5 мг/м³, при включенной системе 428,1 мг/м³. Таким образом, зафиксировано общее снижение концентрации пылевого аэрозоля в лаве на 46,8 %. В точках № 5 и № 3 концентрация снизилась на ~ 40 %, а в точках № 2, № 4, № 6 ~ 65 %. Это объясняется тем, что точки № 5 и № 6 находятся в зонах действия рециркуляционных контуров. Точка № 1 находится на свежей струе, поэтому концентрация пыли в ней практически не изменилось.

Проанализировав результаты проведенных исследований, можно выделить ряд общих рекомендаций для проветривания лав, ведущих селективную выемку.

Уменьшить расстояния между секциями крепи (либо использовать специальные фартуки, перекрывающие щели между секциями крепи). Это мероприятие позволит

усложнить условия, способствующие образованию воздушных контуров, и одновременно снизит количество пылевоздушной смеси, попадающей в рабочую зону лавы из выработанного пространства.

При расчете требуемого количества воздуха для проветривания лавы минимальнаую скорость воздуха увеличить до 2 м/с. Такое мероприятие (при одновременном выполнении первого) позволит исключить наличие вентиляционных контуров, образующихся в результате работы установок механической закладки.

При использовании установок механической закладки необходимо применять систему гидрообеспыливания (результаты испытания представлены ранее), позволяющую даже без задействования первых двух мероприятий снизить концентрацию пыли в лаве более чем на 40 %.

6.5 Выводы

- Селективная выемка полезного ископаемого, сопровождающаяся закладкой глинистогалитового 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. В результате их работы происходит опрокидывание струи воздуха на различных участках лавы. При этом образуются частично замкнутые контуры воздуха.
- 3. Наличие замкнутых воздушных контуров является одной из причин ухудшения пылевой обстановки на рабочих местах.
- 4. 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.
- 5. Для снижения пылеобразования в селективной лаве предлагается использовать элементы системы гидрообеспыливания. Для минимизации негативного влияния влаги в условиях калийного рудника систему гидрообеспыливания необходимо использовать для увлажнения горной массы в момент ее выхода из раструба «метателя».

206

7. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СОЛЯНОЙ ПЫЛИ В СКИПО-ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТВОЛАХ ПРИ ПОДЪЕМЕ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

7.1 Исследование процессов пылеобразования в скипо-вентиляционных стволах

Скиповой подъем полезного ископаемого, включающий в себя погрузку руды в скип и разгрузку скипа в приемный бункер, является одним из наиболее пылящих процессов наряду с непосредственной добычей, сопровождающейся разрушением массива. Особо сложные условия возникают при размещении подъемных сосудов в вентиляционных стволах. С одной стороны, оборудование вентиляционных стволов скиповыми подъемами исключает возможность интенсивного попадания пыли в подаваемый в рудник воздух, но в то же время, такие стволы являются источником загрязнения прилегающих территорий. Кроме того, в скиповых стволах на элементах армировки образуются наросты из окаменелой соляной пыли, которые, в свою очередь, при падении могут травмировать горнорабочих.

Существуют четыре основных фактора, в результате которых в вентиляционном стволе может появиться соляной аэрозоль.

- 1. В процессе разгрузки скипа в приемный бункер, расположенный в копре.
- 2. В процессе загрузки скипа в дозаторной камере.
- 3. В процессе движения запыленной исходящей струи воздуха, поступающей в ствол после проветривания рабочих зон горизонта.
- 4. В процессе движения скипа по стволу.

Пылевыделение при разгрузке скипа в приемный бункер (на примере ствола № 3 рудника 4 PV). Скиповой подъем представляет собой совокупность загрузочных устройств и механизмов, расположенных на горизонте рудника и служащих для загрузки скипов, а также разгрузочных устройств скипов и подъемных машин, расположенных в башенных копрах [56,153,23]. На дневной поверхности объекты скипового подъема входят в подсистему поверхностного комплекса, а именно, в подсистему башенных копров. В момент разгрузки скипа в приемный бункер происходят просыпи рудной мелочи, которые под действием силы тяжести, а также интенсивных потоков воздуха (внешние утечки воздуха) попадают в ствол и на нулевую отметку копра (рис. 7.1). Помимо этого, при разгрузке скипа происходит срыв с разгружаемой руды потоками воздуха и поступление из бункера пылевого облака, образующегося в результате избыточного давления в бункере, создаваемого разгружающейся рудой [13,67,7].

207





Для определения концентрации взвешенного аэрозоля в помещениях башенного копра, образующегося в момент разгрузки скипа, проведены измерения концентрации пыли на отметке + 42,6 м и на отметке 0 м.

На рисунке 7.2 представлена схема точек замера на отметке + 42,6 м, в таблице 7.1 результаты замеров.



Рисунок 7.2 – Схема точек замера на отметке + 42,6 м.

Таблица 7.1 — Результаты замеров

Примечание	Наименование места отбора	Температура, ⁰ С	Влажность, %	ПДК, мг/м ³	Результаты измерения запыленности, мг/м ³
		Ствол № 3, отме	етка + 42 м,		
Curry vo					29,9
	Точка № 1	12,1	50	5	29,9
разгружался					24,9
Скин					109,5
Скин	Точка № 2	12,1	50	5	84,6
разгружался					71,4
		Ствол № 3, от	метка 0 м		
Скин					88,7
Скин	Точка № 1	9,9	60	5	78,8
разгружался					73,9
Стана					24,6
	Точка № 2	9,9	60	5	19,7
разгружался					14,8

Необходимо отметить, что выделившаяся при разгрузке скипа пыль и просыпи лишь частично попадают на отметки +42 м и 0 м. Большая часть с потоком внешних утечек поступает в ствол. Мелкая фракция уносится в вентиляционный канал, крупная (более 3 мм), преодолевая силу воздушного потока, движущегося по стволу со скоростью 5,1 м/с, падает, оседая при этом на расстрелах.

Пылевыделение при загрузке скипа в дозаторной камере.

Ниже вентиляционного горизонта расположены дозаторные камеры, в которых производится загрузка руды в скипы. Южная дозаторная расположена на отметке – 463,8 м, северная – на отметке – 446,8 м. Емкость дозаторной камеры соответствует емкости скипа. Схематическое изображение ствола и дозаторных камер представлено на рисунке 7.3.



Рисунок 7.3 – Схематическое изображение ствола и дозаторных камер

В момент загрузки скипа происходит срыв пыли с потока загружаемой руды. Часть пыли увлекается воздушным потоком вверх, однако скорость воздуха в стволе на данном участке не велика (0,35 м/с), поэтому крупная фракция и значительная часть мелкой оседают на армировке ствола, в зоне загрузки скипа, либо опускаются в зумпф.

В таблице 7.2. представлены результаты замеров концентрации пыли, выполненные в местах загрузки скипов.

Примечание	Наименование места отбора	Температура, ⁰ С	Влажность, %	ПДК, мг/м ³	Резул изме запыле мі	іьтаты рения енности, ∵/м ³
					Замер	Среднее значение
	Ствол.	№ 3, Северная д	озаторная кам	иера		
Загрузка	Нижняя	21,8	37	5	14639	14799
скипа	площадка	21,8	37	5	13938	14200
Загрузка	Нижняя	21,8	37	5	725	604
«дозы»	площадка	21,8	37	5	483	004
Загрузка	Верхняя	21,8	37	5	2299	2227
скипа	площадка	21,9	37	5	2175	2237
	Ствол	№ 3, Южная до	эзаторная каме	epa		
Загрузка	Нижняя	22,8	37	5	5520	5440
скипа	площадка	22,8	37	5	5360	5440
Загрузка	Нижняя	22,8	37	5	403	401
«дозы»	площадка	22,8	37	5	398	401
Загрузка	Верхняя	22,8	37	5	6689	6112
скипа	площадка	22,8	37	5	6196	0445

Таблица 7.2 — Результаты замеров концентрации пылив местах загрузки скипов.

					Результаты		
					изме	рения	
Примонацио	Наименование	Температура,	Влажность,	ПДК,	запыле	енности,	
примечание	места отбора	$^{0}\mathrm{C}$	%	$M\Gamma/M^3$	$M\Gamma/M^3$		
					Zavan	Среднее	
					Замер	значение	
Загрузка	Верхняя	22,8	37	5	1537	1006	
«дозы»	площадка	22,8	37	5	874	1000	

Количество воздуха, поступающего в ствол через северную камеру, составляет 191,5 м³/мин, через южную камеру – 109,6 м³/мин.

Поступление пыли с исходящей струей.

Основная часть воздуха с горизонта удаляется по главным вентиляционным штрекам западного и восточного крыльев. Часть воздуха поступает в ствол через камеры питателей и дозаторные камеры, а также через уклон чистки зумпфа.

Баланс воздуха, поступающего в ствол:

- южная камера питателей 109,6 м³/мин (0,9 %);
- северная камера питателей 191,5 м³/мин (1,6%);
- уклон чистки зумпфа 518 м³/мин (4,4 %);
- главный вентиляционный штрек западного крыла 5746 м³/мин (48,4 %);
- главный вентиляционный штрек восточного крыла 5314 м³/мин (44,7 %).

Для определения количества пыли, поступающей в ствол с исходящим воздухом, проведены замеры концентрации пыли в главных вентиляционных штреках в выработке чистки зумпфа. Принципиальная схема расположения точек замера представлена на рисунке 7.4, результаты - в таблице 7.3.



Рисунок 7.4 – Принципиальная схема расположения точек замера

Примечание	Наименование места отбора	Температура, ⁰ С	Влажность, %	ПДК, мг/м ³	Результаты измерения запыленности, мг/м ³			
	Ствол № 3, главные вентиляционные штреки							
т 1	Doomourioo imputito	19,6	47	5	6,1			
1.1	восточное крыло	19,6	47	5	5,0			
		19,3	49	5	10,1			
тэ	Западное Крыло	19,3	49	5	7,1			
1.2		19,3	49	5	7,1			
		19,3	49	5	6,1			
Ствол № 3, выработка чистки зумпфа								
Т 2	Выработка	20,2	37,0	5	4,1			
1.3	чистки зумпфа	20,2	37,0	5	3,1			

Таблица 7.3 — Результаты замеров массовой концентрации пыли

Средняя концентрация пыли в исходящем потоке западного крыла составляет 7,6 мг/м³, восточного крыла – 5,6 мг/м³, в выработке чистки зумпфа - 3,6 мг/м³.

Выделение пыли в процессе движения скипа по стволу.

Выделение пыли и рудной мелочи происходит вследствие резкого увеличения скорости воздушного потока, в основном, при прохождении скипами сопряжения ствола с главными вентиляционными штреками, при встрече скипов в стволе, при прохождении скипами сопряжения ствола и вентиляционного канала.

Значительную долю пыли в стволах составляют просыпи руды при разгрузке скипа в бункер. Большую роль здесь играют два фактора: - точная остановка скипа перед разгрузкой; - качество уплотнительной «шторы».

Точная остановка скипа перед разгрузкой в бункер полностью зависит от настройки автоматики и опытности машиниста подъемной машины.

Уплотнительные «шторы» служат для предотвращения просыпи руды в ствол. Через определенное время они приходят в негодность. Примером тому служат скипы ствола № 4 (рис. 7.5).

212



Рисунок 7.5 – Уплотнительные шторы скипов ствола № 4

В целом, с использованием данных, полученных в ходе натурных замеров, сформирована карта интенсивности очагов пылевыделения (рис. 7.6).



Рисунок 7.6 – Карта интенсивности очагов пыле выделения

7.2 Анализ образования пылесолевых наростов на элементах крепи скиповентиляционного ствола

Выявленные очаги пылеобразования в вентиляционных стволах приводят к постоянному взаимодействию пылевого аэрозоля с воздушными потоками и, как следствие, к образованию в вентиляционных стволах соляных наростов на расстрелах и элементах армировки.

Исследования проводились на стволе диаметром 7 м, глубиной 898 м. Ярусы в стволе располагаются через каждые 6 метров. На рисунке 7.7 представлена принципиальная схема армировки ствола.



Рисунок 7.7 – Схема армировки ствола

На верхних частях расстрелов, начиная с верхних ярусов, присутствуют соляные наросты, достигающие по высоте 0,5 м. На нижних частях расстрелов наростов не обнаружено, вплоть до -50 яруса. Сечение соляного нароста близко к трапеции со скругленным основанием. На рисунке 7.8 представлены изображения расстрелов и образовавшихся на них соляных наростов верхней части ствола.



Подобная картина наблюдается на всех расстрелах вплоть до -50 яруса. Исключением являются расстрелы, очищенные для проведения ремонтных работ в стволе.

На этих расстрелах наблюдается накопление соляных частиц довольно крупных фракций 1- 2мм. Частицы подобных размеров в обычных условиях не могут находиться во взвешенном состоянии. Однако в условиях мощного вертикального потока (скорость воздуха 5 м/с) такие частицы перемещаются вместе с потоком воздуха и, попадая в зону аэродинамической тени расстрела, оседают на его поверхности, тогда как более мелкие частицы на начальном этапе выносятся из этой зоны. На рисунке 7.9 представлена фотография очищенного расстрела, на котором отчетливо прослеживается фракционный состав частиц, осевших на поверхности расстрела.





Рисунок 7.9 – Крупные частицы, осевшие на очищенном расстреле

Начиная с -50 яруса появляются соляные наросты на нижней части расстрелов (рис 7.10).



Рисунок 7.10 – Образование соляного нароста на нижней части расстрелов На участке ствола между сопряжением с главными вентиляционными выработками и дозаторными камерами количество соли на расстрелах весьма велико, однако, ввиду меньшего влияния влажности воздуха и значительно меньшей скорости воздушного потока, пыль на расстрелах более рыхлая и мелкая.

7.3 Исследование процессов витания соляного аэрозоля в вертикальном воздушном потоке и образования соляных наростов на элементах армировки ствола

Согласно имеющимся представлениям, частицы гигроскопичного материала, будучи взвешенными в движущемся потоке воздуха, при относительной влажности его, превышающей критическую величину, начинают быстро увеличиваться в размерах, проходя при этом две стадии – конденсационного и коагуляционного роста. В результате размеры частиц в 20–40 раз могут превышать первоначальные. Степень роста гигроскопических частиц зависит как от их свойств, так и от гидродинамических характеристик потока.

В настоящее время имеется несколько уравнений, описывающих траекторию и концентрацию витающих частиц в потоке [171]. Однако все авторы исходят из того, что
усредненный диаметр частиц в процессе движения остается неизменным, либо рост размеров происходит только за счет коагуляции частиц. Вместе с тем, как показывают непосредственные наблюдения и расчеты, для частиц гигроскопичной пыли определяющим является конденсационный рост. Кроме того, если учесть, что механизм коагуляционного роста пылинок в корне отличается от конденсационного, становится очевидным, что существующие теории не могут быть использованы для описания движения гигроскопичных частиц в воздушном потоке.

Таким образом, для разработки теории осаждения гигроскопичных частиц из увлажненного воздушного потока необходимо, прежде всего, изучить механизм взаимодействия витающих частиц гигроскопичного аэрозоля с водяными парами воздуха. Витающая пыль калийных рудников представляет собой частицы солей сильвинита, карналлита и каменной соли. Эти соли являются гигроскопичными веществами, поэтому при попадании кристаллов в атмосферу они адсорбируют на своей поверхности молекулы водяного пара. Весьма высокая адсорбция паров воды из воздуха калийными солями объясняется строением кристаллов и полярностью молекул воды.

Частицы солей, попадая в атмосферу, практически мгновенно покрываются мономолекулярным слоем воды. Установлено, что вода в мономолекулярном слое обладает рядом свойств, которые отличают ее от воды в обычном смысле слова. Она не растворяет многие вещества, замерзает при более низких температурах и т. д.

При так называемой критической влажности воздуха количество адсорбированных и десорбированных молекул является постоянной величиной. Критическая влажность воздуха (порог гигроскопичности) для различных солей различна.

Увеличение относительной влажности воздуха до величины, превышающей порог гигроскопичности, приводит к увлажнению и растворению соли до образования рассола.

В соответствии с законом Рауля, парциальное давление насыщенного пара над раствором всегда меньше, чем над чистым растворителем, поэтому при $\phi > \phi_{\kappa p}$ будет происходить поглощение влаги из воздуха до полного растворения кристалла и образования насыщенного рассола. Дальнейшее поглощение паров каплей рассола будет происходить до определенной конечной концентрации этого рассола, то есть пока парциальное давление паров воды в воздухе не сравнится с парциальным давлением паров над поверхностью рассола.

Рост частиц гигроскопичного аэрозоля в атмосферном воздухе можно разбить на две стадии: 1) конденсационный рост и 2) коагуляционный рост. Исследование конденсационного роста частиц гигроскопического вещества в потоке провели рассматривался в работах [112, 168, 50, 148, 89, 61, 87].

7.4 Исследование процессов роста соляных образований в стволах

Известно, что не всякое столкновение капель приводит к их слиянию. Работы этого направления, выполненные Л. Ф. Леоновым и П. С. Прохоровым [125], заслуживают особого внимания. Во всех указанных работах отмечается в качестве характерной особенности процесса образование тонкой соединительной нити между каплями в момент их столкновения. Время контакта капель ~ 10⁻³ сек. В тех случаях, когда слияние капель не происходит, наблюдается разрыв канала. В. В. Дерягин и П. С. Прохоров впервые обратили внимание на зависимость процессов слияния капель от относительной влажности воздуха. Исследователи обнаружили, что в условиях ненасыщенного воздуха капли могут длительное время находиться в соприкосновении, не сливаясь, в то время как слияние в насыщенном воздухе происходит почти мгновенно.

Погрузка руды в скипы и подъём её на поверхность сопровождается образованием большого количества соляной пыли, которая увлекается исходящей из рудника струёй воздуха и также выносится на поверхность. Однако в процессе своего движения вверх по вентиляционному стволу некоторые частицы пыли проходят вблизи балок расстрелов, попадают в область их «аэродинамической тени» и оседают на верхней поверхности балок под действием силы тяжести. Гигроскопичность соляной пыли и наличие влаги в воздухе со временем приводят к размоканию, слипанию и затвердеванию этого осадка. В результате соляной нарост увеличивается, превышает ширину балки, сползает по бокам и при достижении определённой массы отрывается и падает вниз, что может привести при столкновении к серьёзным повреждениям скипов, а также представлять угрозу жизни для людей, находящихся внизу.

В процессе оседания пыли на верхнюю поверхность балок расстрелов участвуют два физических механизма, определяющих интенсивность этого процесса: 1) турбулентная диффузия пыли из основного, движущегося вверх потока воздуха, в вихревую непроточную область воздуха над балкой; 2) оседание пыли на поверхность балки под действием силы тяжести.

Поскольку размер вихревой зоны «аэродинамической тени» над верхней поверхностью балки должен быть порядка её ширины, то, предполагая наличие двух вихрей в этой зоне, высоту её следует положить равной полуширине балки ℓ (м). В этом случае уравнение диффузии может быть записано в виде:

$$J = D_T \frac{c_0 - C}{\ell} S,\tag{7.1}$$

218

где J – приток пыли из основного потока воздуха в область «аэродинамической тени» над балкой (кг/с), D_T – коэффициент турбулентной диффузии пыли (м²/с), C_0 – массовая концентрация пыли в основном потоке воздуха (кг/м³), $C < C_0$ – массовая концентрация пыли над балкой (кг/м³), $S = 2\ell H$ - площадь поверхности диффузии пыли (м²), H – длина балки (м).

С другой стороны, в предположении стационарности процессов диффузии и осаждения пыли *C=const*, интенсивность осаждения пыли должна совпадать с интенсивностью диффузии:

$$J = \frac{m}{t},\tag{7.2}$$

здесь $m = C \cdot 2\ell \cdot \ell \cdot H$ - общая масса пыли в «теневой» области над балкой (кг), $t = \frac{\ell}{v}$ - время осаждения пыли на поверхность балки (с), $v = \frac{1}{18}d^2g(\rho - \rho_0)/\mu$ - скорость оседания v (м/с) частицы пыли размером d (м) и плотностью ρ (кг/м³) в воздухе с плотностью ρ_0 (кг/м³) и динамической вязкостью μ (кг/(м·с)), g=9.8 м/с² – ускорение свободного падения.

Из равенств (7.1) и (7.2) находится концентрация пыли С:

$$C = \frac{C_0}{1 + \frac{1}{D_T} \frac{v}{\ell}}$$
(7.3)

и после подстановки в (7.2) с использованием выражения для *v* находится интенсивность оседания соляной пыли на единицу длины балки расстрела вентиляционного ствола *j* (кг/(м·с)):

$$j = \frac{2C_0}{\frac{1}{D_T} + \frac{18\mu}{g(\rho - \rho_0)d^2\ell}}.$$
(7.4)

Из анализа полученной формулы (7.4) следует, что определяющим интенсивность образования соляного нароста на балке параметром является размер частиц пыли *d*. Чем больше размер частиц, тем слабее диффузия и быстрее осаждение, т.е. определяющим интенсивность является механизм диффузии:

$$\frac{1}{D_T} >> \frac{18\mu}{g(\rho - \rho_0)d^2\ell} \text{ M } j \approx 2C_0 D_T.$$
(7.5)

Разумеется, размер частиц пыли не может быть больше $\sqrt{\frac{18\mu V}{g(\rho-\rho_0)}}$, (V – скорость движения воздуха по вентиляционному стволу), иначе подъёмной силы воздушного потока не хватило бы для движения частиц пыли вверх. Напротив, чем меньше размер частиц, тем интенсивнее происходит диффузия и медленнее процесс осаждения

$$\frac{1}{D_T} << \frac{18\mu}{g(\rho - \rho_0)d^2\ell} \quad \text{M} \quad j \approx \frac{2C_0 g(\rho - \rho_0)d^2\ell}{9\mu}.$$
(7.6)

В этом случае определяющим скорость образования нароста является механизм оседания.

7.5 Создание пространственной модели вентиляционного ствола

Одним из наиболее эффективных способов исследования динамики воздушных потоков в сложных (труднодоступных, неудобных для постоянного мониторинга) условиях является трехмерное математическое моделирование аэродинамических процессов с использованием вычислительной техники. Одним из передовых направлений в трехмерном моделировании является прикладной пакет программ - SolidWorks. Пакет является наиболее удобным и доступным в освоении, и занимает ведущие позиции среди продуктов этого класса. Структура модели в SolidWorks такая же, как и во всех пакетах параметрического моделирования. В основе модели лежат конструкционные элементы - плоскости, точки или оси, на которых из "элементов эскиза" (т. е., отрезков, дуг и т.д.) строятся "эскизы" - 2-х или 3-х мерные кривые, как правило, замкнутые. Эскизы, в свою очередь, являются основой для "элементов детали", из которых строится деталь.

В целом построение пространственной модели можно разбить на шесть основных этапов.

- 1. Изучение имеющихся графических материалов (схем, чертежей и т.д.). На этом этапе собирается точная информация о геометрических размерах объекта, материале, из которого состоит объект, и основные его особенности.
- 2. Создание эскизов, то есть двумерного профиля и поперечного сечения исследуемой модели по чертежам (рис. 7.11).



Рисунок 7.11 – Изображение двумерного профиля поперечного сечения ствола, а) двумерный профиль, б) чертеж поперечного сечения ствола

3. Придание объема по созданным ранее эскизам, создание стенок, основных контуров исследуемого объекта (рис. 7.12).



Рисунок 7.12 – Изображение этапа придания объема двумерным эскизам

4. Создание проекта FloWorks (рис. 7.13), где содержатся все данные о постановке задачи, особенности её моделирования и результатах расчета. Проект связан с исследуемой геометрической конфигурацией модели, которая однозначно определяет соответствие между геометрическим исполнением модели и её гидрогазодинамическими характеристиками.

meral settings			Contra participation
Fluids	Path	New	Navigator
 Gases Liquids 			Analysis type
Non-Newtonian Liquids			-
Compressible Liquids Real Gases			Contraction Eluida
⊕ Near Clases			Wall conditions
			initial conditions
		-	
		Add	
Project Fluids	Default Fluid	Bemove	<u>6</u>
Air (Gases)	V		
		Heplace	
Flow Characteristic	Value		
Flow type High Mach sumber flow	Laminar and Turbulent		
Humidite	171	-	

Рисунок 7.13 – Окно приложения FloWorks

5. Задание граничных условий: объемный расход воздуха на выходном отверстии, атмосферное давление, реальная стенка. При решении внутренней задачи граничные условия задаются на поверхностях модели, т.е. на её стенках и отверстиях, а также, если необходимо, условие симметрии на границах расчетной области. Заданные граничные условия можно схематично визуализировать непосредственно на модели в графическом окне с помощью окрашенных стрелок, указывающих направление потока и вид граничного условия (рис. 7.14).



Рисунок 7.14 – Визуализация граничных условий

6. Генерация и адаптация расчетной сетки непосредственно по модели, задание критериев автоматической остановки расчета. Математическая задача решается на некоторой расчетной сетке с пространственными ячейками в форме параллелепипедов, которая в FloWorks строится автоматически, но на основании характеризующих ее установок, заданных пользователем или используемых по умолчанию. Сетка, применяемая в FloWorks, является прямоугольной и адаптивной. Сетка состоит из базовых ячеек, некоторые из них могут быть подроблены. Базовые ячейки задаются тремя наборами базовых плоскостей, соответствующих трем осям декартовой системы координат. В общем случае расстояние между плоскостями в этих наборах может быть различным. При дроблении ячейка разбивается на 8 равных частей путем деления пополам по осям X, Y и Z. Каждая из этих ячеек также может быть поделена аналогичным образом и т. д.



Рисунок 7.15 – Генерация и адаптация расчетной сетки

Процесс создания расчетной сетки осуществляется в три этапа:

- 1. Создание базовой расчетной сетки непосредственно сразу после задания характеризующих ее параметры.
- Создание начальной расчетной сетки (на основе базовой расчетной сетки) сразу после запуска задачи на счет.
- Модификация расчетной сетки в процессе решения задачи для лучшего разрешения областей расчетной области с сильным изменением решения – если пользователем заданы соответствующие условия.

Результат после выполнения всех этапов - пространственная модель ствола, полностью соответствующая реальным прототипам. На рисунке 7.16 представлен фрагмент одного из вентиляционных стволов рудника 4 РУ.



Рисунок 7.16 – Фрагмент модели вентиляционного ствола рудника 4 РУ

7.6 Результаты численного эксперимента по изучению аэродинамических теней, создаваемых армировкой и расстрелами ствола

В процессе исследования разработана физическая модель образования соляных наростов. Запыленный воздух движется вверх по стволу, обтекая расстрелы и крепь. При обтекании воздухом некоторые частицы пыли проходят вблизи балок расстрелов, попадают в область их «аэродинамической тени» и оседают на верхней поверхности балок под действием силы тяжести.

На базе разработанной пространственной модели проведен численный эксперимент, подтверждающий физическую модель и позволяющий оценить характер и размеры аэродинамической тени, возникающей над расстрелом в результате его обтекания потоком воздуха. На рисунках 7.17–7.18 показаны линии тока и поля скоростей, возникающие при обтекании расстрела ствола № 3 рудника РУ-4 воздушным потоком. Поперечное сечение расстрела 135×210 мм. Скорость воздушного потока в стволе 5 м/с.



Рисунок 7.17 – Линии тока, возникающие при обтекании расстрела ствола № 3 рудника РУ-4 воздушным потоком



Рисунок 7.18 – Поля скоростей, возникающие при обтекании расстрела ствола № 3 рудника РУ-4 воздушным потоком

Из рисунков видно, что высота аэродинамической тени составляет 750–850 мм. В этой области образуются два независимых вихря со скоростями движения воздуха, близкими к нулю.

Очевидно, что размеры аэродинамической тени напрямую зависят от скорости воздушного потока и формы стоящего на пути потока тела (в данном случае расстрела). Скорость воздушного потока в стволе зависит от количества воздуха, поступающего в рудник, которое, в свою очередь, определяется соответствующим расчетом.

Форму расстрела можно изменить путем установки специальных обтекателей, которые позволяют изменить лобовое сопротивление расстрела и, как следствие, размеры области аэродинамической тени. Численное моделирование в программном приложении SolidWorks позволило оценить эффективность разных видов обтекателей и выбрать наиболее подходящий для данных условий.

Практически полностью избавиться от аэродинамической тени можно, использовав обтекатель в форме самолетного крыла (рис. 7.19). При этом результаты численного моделирования показывают, что высота обтекателя должна быть 90 см.



Рисунок 7.19 – Поля скоростей, возникающие при обтекании расстрела ствола № 3 рудника РУ-4 воздушным потоком, и форма обтекателя

В производственных условиях рудника обтекатель такой формы и таких размеров не может быть использован в силу особенности эксплуатации ствола, поэтому рассмотрены другие виды обтекателей.

На рисунке 7.20 представлены варианты расчета с различными типами обтекателей.



Рисунок 7.20 – Поля скоростей, возникающие при обтекании расстрела с различными формами обтекателей

Наименьшую аэродинамическую тень создают обтекатели на рисунках (г) и (д). Высота тени в обоих случаях не превышает 200 мм (высота расстрела 210 мм). Высота аэродинамической тени над расстрелом, не оборудованном обтекателем составляет 840 мм. Использование предложенных обтекателей позволит снизить скорость образования соляных наростов на расстрелах. Необходимо отметить, что установка обтекателей на расстрелах позволяет снизить аэродинамическое сопротивление ствола, что, в свою очередь, позволит экономить электроэнергию, потребляемую вентиляторами главного проветривания.

7.7 Исследование распространения соляного аэрозоля в условиях сложной геометрии аэродинамической системы «башенный копер – атмосфера»

Описываемые ниже исследования были проведены нами с целью разработки вариантов решения задачи снижения концентрации соляного аэрозоля в помещениях башенного копра и, как следствие, минимизации воздействия соляных частиц на электрооборудование, размещенное в копре.

При размещении главных вентиляторных установок на дневной поверхности, пыль, образующаяся при разгрузке скипов, движется вниз к нулевой отметке копра и затягивается воздушным потоком в вентиляционный канал, откуда выбрасывается в атмосферу. Если не брать во внимание экологический аспект, то при данной схеме проветривания негативного воздействия воздушно-пылевых потоков на оборудование и горнорабочих не происходит.

Однако на руднике существует проблема большого количества внешних утечек воздуха. Для решения этой проблемы планируется расположить вентилятор главного проветривания ствола № 3 в выработках горизонта -440 м. В этом случае в башенном копре ствола № 3 может возникнуть сложная пылевая обстановка, поскольку в этом случае направление движения воздуха в копре изменится на противоположное. Пылевоздушные потоки, образующиеся при разгрузке скипа, будут подниматься в сторону верхних отметок, где расположено электрооборудование.

Для определения путей распространения пылевого аэрозоля во внутреннем пространстве башенного копра (для примера, к рассмотрению принят башенный копер 4 РУ ОАО «Беларуськалий») необходимо исследовать задачу распределения воздушных потоков, учитывающую геометрию копра и реальные аэродинамические связи с внешней атмосферой. В силу сложной геометрии аналитическое решение задачи не представляется возможным, поэтому выполнено численное моделирование в приложении COSMOSFloWorks программно-вычислительного комплекса SolidWorks.

Однако для численного расчета необходима геометрическая модель копра, как пространства расчетной области, и граничные условия, которые задают значения полей скоростей и давления на границах этой области.

Для создания геометрической модели копра использовались проектные чертежи. Однако здание копра не является идеально герметичным – по всей высоте имеют место неравномерно распределенные отверстия, соединяющие внутреннее пространство копра с атмосферой. Наличие этих отверстий обусловливает наличие утечек воздуха через все здание копра. Кроме того, эти отверстия играют определяющую роль при распределении воздушных потоков в здании копра. Поэтому в любом случае необходимо адекватное реальности

228

отражение картины распределения утечек по всему зданию копра при построении его расчетной геометрической модели.

Для этого необходимо измерить распределение утечек вдоль всей высоты копра, и в дальнейшем при построении расчетной модели по ее высоте расположить отверстияэквиваленты, моделирующие утечки. При этом параметры каждого из этих отверстий выбираются таким образом, чтобы в итоге распределение утечек воздуха на расчетной модели совпадало с измеренным распределением утечек.

Таким образом, для построения геометрии расчетной модели копра необходимо провести натурное исследование распределения утечек воздуха внутри копра. *Проведение натурного эксперимента.*

В ходе натурного эксперимента проведено моделирование ситуации воздухораспределения в том случае, когда вентилятор главного проветривания (ВГП) будет работать под землей. В таком случае воздух будет поступать из ствола в копер, а затем через отверстия копра в атмосферу.

В настоящее же время ВГП находится на поверхности и в нормальном режиме работает по всасывающей схеме. Это приводит к обратному требуемому движению воздуха в копре – воздух через отверстия поступает во внутреннее пространство копра и уже оттуда уходит в вентиляционный ствол. В этих условиях натурно смоделировать требуемое движение воздуха в копре можно реверсированием ВГП, что приведет к опрокидыванию направления движения воздуха в копре. Помимо всего прочего, это позволит натурно измерить отношение между количеством воздуха, поступающим в атмосферу через копер и через вентиляционный канал.

Согласно расчетам, подземный ВГП будет обеспечивать расход в 12000 м³/мин. Большая часть этого воздуха будет выходить в атмосферу через вентиляционный канал и диффузор, остальная часть – через копер. Соотношение этих частей зависит от аэродинамических сопротивлений каждого участка. Однако в эксперименте воздух в вентиляционную систему поступает через вентиляционный канал, поэтому возникает проблема моделирования движения воздуха через вентиляционный канал. Это проблема была решена следующим образом. В копре на нулевой отметке распложены ворота, открыв которые, можно смоделировать выход воздуха в атмосферу через вентиляционный канал в ситуации, когда ВГП будет находиться под землей. Остальная часть воздуха будет уходить в атмосферу через отверстия копра. Существенным является вопрос определения сечения «вентокна» чтобы его сопротивление соответствовало ворот, сопротивлению вентиляционного канала. Для решения этой задачи был использован аналитический комплекс «Аэросеть». В существующей расчетной вентиляционной сети рудника была создана дополнительная ветвь, имитирующая ворота копра, параллельно существующим ветвям копра и вентиляционного канала. Аэродинамическое сопротивление этой ветви было задано крайне

малым, однако в ней было установлено вентиляционное окно, регулируя площадь сечения которого, можно регулировать аэродинамическое сопротивление ветви в необходимых пределах. Затем методом вариантов была подобрана такая площадь сечения вентиляционного окна, чтобы аэродинамическое сопротивление этой ветви соответствовало аэродинамическому сопротивлению вентиляционного канала. В результате получено, что площадь сечения 12 м² обеспечивает равенство аэродинамических сопротивлений выхода воздуха как через вентиляционный канал, так и через ворота копра, и тем самым позволяет адекватно моделировать движение воздуха при направлении течения воздушных потоков, соответствующих расположению ВГП под землей.

В итоге эксперимент проводился следующим образом. Изначально открывалась одна створка ворот копра на нулевой отметке. Далее производилось реверсирование ВГП и регулировка его подачи таким образом, чтобы в копер поступало необходимое количество воздуха (в ходе эксперимента получена цифра 12813 м³/мин, эта величина определялась как разность общего количество воздуха, проходящего через ВГП, и количества воздуха, поступающего в шахту). Часть этого воздуха выходила через открытую створку ворот, тем самым имитируя выход воздуха через вентиляционный канал, остальная его часть поступала в атмосферу через отверстия в здании копра. Полученные результаты позволяют утверждать, что при работе ВГП под землей через вентиляционный канал в атмосферу будет поступать 8354 м³/мин воздуха, что составляет приблизительно 65 % от общего количества воздуха, поступающего из шахты. А через отверстия копра будет идти соответственно 4459 м³/мин.

Однако первостепенной целью поставленного эксперимента было определение распределения утечек по высоте копра. Эта задача в ходе эксперимента решалась путем измерения количества воздуха через поперечное сечение станка копра на разных высотных отметках +26, +53 и +60 м. В результате получена следующая картина распределения утечек (см. рисунок 7.21).

230



Рисунок 7.21 – Замеры расходов воздуха в различных сечениях копра по высоте

Заметим, что на представленной схеме изображен вентиляционный канал с движением воздуха в нем, соответствующим действительной работе ВГП под землей. Напомним, что в ходе эксперимента эта величина определялась как количества воздуха, проходящего через открытую створку ворот копра.

На основании этих результатов можно определить количество утечек воздуха на отдельных участках копра по высоте, и при построении расчетной геометрической модели

копра задать на этих участках отверстия, имитирующие утечки таким образом, чтобы впоследствии расчетное количество утечек на участке совпадало с измеренным. В таблице 7.4 приведено рассчитанное количество утечек воздуха по каждому участку копра на основании экспериментальных данных.

Высотные отметки, ограничивающие участки копра, м.	Количество утечек, м ³ /мин	
0 - +26	1255	
+26 - +53	2478	
+53 - +60	430	
+60 - +124	296	

Таблица 7.4 — Количество утечек по различным участкам копра

Построение расчетной геометрической модели копра в программно-вычислительным комплексе SolidWorks.

По проектным чертежам построена расчетная геометрическая модель копра в программно-вычислительном комплексе SolidWorks. Далее модель уточнена на предмет наличия в здании копра множества отверстий, обеспечивающих аэродинамическую связь между внутренним пространством копра и атмосферой. При этом множество отверстий на каждом высотном участке копра моделировалось при помощи эквивалентных отверстий, размер которых подбирался исходя из равенства замеренного количества утечек и рассчитанного через эквивалентные отверстия. В итоге этим обеспечивалось равенство аэродинамических сопротивлений разработанной модели и реальной конструкции копра, а также максимально приближенное к реальности моделирование распределения воздушных потоков внутри него. Результат численного моделирования воздухораспределения внутри копра на полученной модели представлен на рисунке 7.22.

Построение адекватной реальности расчетной геометрической модели копра позволяет в дальнейшем точно рассчитывать динамику распространения пылевого аэрозоля во внутренних помещениях. Движение пыли определяется направлением движения воздушных потоков.

232





Пылевой аэрозоль, который образуется при разгрузке скипов в районе отметок 42– 48 м., восходящим потоком воздуха переносится в вышележащее пространство копра. Причем в первом приближении можно считать, что количество пыли по различным высотным отметкам распределится пропорционально количеству воздуха на каждой из них. В данном же рассмотрении важно то, что пылевой аэрозоль, распространяясь вверх по копру, может попасть в помещение преобразователей и подъемных машин, что недопустимо. Поэтому необходимо разработать меры, которые бы позволили устранить это.

7.8 Исследование возможных способов борьбы с соляной пылью внутри копра

Оценка количества запыленного воздуха, возникающего при разгрузке скипов.

Подъем руды на поверхность осуществляется четырьмя скипами – два скипа объемом 35 м³, подъем и спуск которых осуществляется подъемными машинами ЦШ, и два скипа объемом 19 м³, подъем и спуск которых осуществляется подъемными машинами МК.

Разгрузка каждого из скипов осуществляется в бункер, соответственно для каждого скипа имеется свой бункер. Разгрузка скипа в бункер осуществляется через течку прямоугольной формы, размеры которой зависят от объема скипа. Для разгрузки скипов объемом 35 м3 ширина течки равна 2100 мм, а высота 3000 мм, а для скипов объемом 19 м³ соответственно 1900 мм и 3000 мм. Кроме того, бункеры для разгрузки скипов одинаковой емкости аэродинамически связаны между собой через отверстие в боковых стенках. Отверстие имеет вытянутую прямоугольную форму с шириной 7000 мм и высотой 1000 мм. Скипы, работающие на спаренные бункеры, разгружаются поочередно. При этом процесс разгрузки сопровождается интенсивным пылеобразованием.

Физически интенсивное образование пыли объясняется следующим образом. Когда один из скипов разгружается в бункер через течку, происходит интенсивное пыление из-за падения руды. Кроме того, внутренний объем в бункере, заполненный запыленным воздухом, начинает уменьшаться за счет поступления руды. Поэтому происходит процесс вытеснения запыленного воздуха из бункера в соседний бункер через отверстие, и, далее, через открытую течку в пространство станка копра. То есть, при разгрузке скипа в бункер из течки соседнего бункера, имеющего с загружающимся аэродинамическую связь, с некоторой скоростью поступает запыленный воздух. Оценим величину этой скорости. Для этого представим следующую расчетную схему, справедливую для каждой из пар аэродинамически связанных бункеров (рисунок 7.23).



Рисунок 7.23 – Схематичное изображение вытеснения запыленного воздуха из объема бункеров

Из физической постановки задачи ясно, что скорость уменьшения свободного объема внутри бункера равна объемному расходу из бункера, и, следовательно, поскольку воздуху некуда выходить, кроме как через течку соседнего бункера, суммарному объему воздуха, выходящего через течку в пространство копра. Уменьшение свободного объема внутри бункера можно выразить через поступление в него объема руды из скипа, с учетом объема скипа и времени его разгрузки. В первом приближении будем иметь:

$$Q_{\rm руды} = \frac{V}{T} \tag{7.7}$$

Как мы уже отмечали, расход запыленного воздуха через течку будет равен этой величине. Учитывая соотношение между скоростью и расходом воздуха:

$$Q = vS \tag{7.8}$$

где v – скорость воздуха, S- площадь поперечного сечения течки бункера. Таким образом, для скорости движения воздуха из течки бункера при загрузке соседнего бункера будем иметь выражение:

$$v = \frac{V}{ST}$$
(7.9)

Нами экспериментально установлено, что время разгрузки скипа составляет 30 секунд. Тогда объем вытесняемого воздуха из бункеров, работающих со скипами 35 м³, будет иметь значение:

$$Q_{35} = 70 \text{ м}^3$$
/мин
 $v_{35} = \frac{35}{6,3 \cdot 30} = 0,18 \text{ м/d}$

А для бункеров, работающих со скипами 19 м³:

$$Q_{19} = 36 \text{ м}^3$$
/мин
 $v_{19} = \frac{19}{6,3 \cdot 30} = 0,1 \text{ м/с}$

Естественно, рассчитанные расходы запыленного воздуха действуют непостоянно, а только в течение периода разгрузки скипа. Поэтому график расхода запыленного воздуха будет иметь цикличный вид. Кроме того, оценивая количество выделяющегося пылевого воздуха, мы не учли образование пыли в силу неизбежно возникающих просыпей при разгрузке. Образование просыпей при этом вызывается негерметичным соединением скипа с течкой.

Варианты борьбы с пылью.

В случае больших объемов и концентраций пыли эффективней всего стараться не допускать распространения пыли из мест ее образования. С этой точки зрения можно рассмотреть следующие варианты борьбы с пылью:

 перекрыть открытые течки, через которые запыленный воздух выходит во внутреннее пространство копра при разгрузке скипов;

— организовать отсос пылевого воздуха.

Первый вариант заключается в установке своего рода штор, перекрывающих течки. При начале загрузки падающая руда открывает эту штору, позволяя руде загружаться в бункер. При этом течка соседнего бункера оказывается закрытой, поэтому вытеснение запыленного воздуха из бункеров уменьшается. Однако опыт применения подобных конструкций показывает, что они являются малоэффективными по следующим причинам. Вопервых, для значительной герметизации необходимо, чтобы шторка прилегала к отверстию течки плотно. В начальный и конечный моменты времени падающая руда имеет небольшой импульс, поэтому открытие плотно прижатой шторы будет сопровождаться возникновением значительных просыпей руды, которые при падении вызовут интенсивное пыление. Если же шторы сделать неплотно прилегающими к течкам, то запыленный воздух будет выходить из бункеров через щели. Получается, что такой способ борьбы не эффективен.

В связи с этим подробно остановимся на способе борьбы с пылью путем организации отсоса пылевого воздуха. При этом необходимо выбрать места и мощности отсоса пылевого воздуха на основании существующей ситуации пылераспределения.

Как мы уже отмечали, движение пылевого аэрозоля определяется движением воздушных потоков. Основная часть пыли образуется в станке копра на участке, заключенном между отметками +42 - +48 м. Согласно замерам и расчетам на этот участок поступает 2933 м³/мин воздуха. Из них 681 м³/мин при этом поднимается по копру, на отметки +53 и выше, где находятся электрические машины.

Результаты натурного эксперимента показывают, что выше отметки +26 м поступает порядка 3000 м³/мин воздуха, причем большая часть его теряется в виде утечек на участке +26-+53 м (отметим, что до отметки +53 м доходит только 926 м³/мин воздуха). На этом основании можно предположить, что установка пылеуловителей суммарной мощностью 2500 м³/мин должна быть достаточной для того, чтобы изменить направления воздуха на участке копра выше +53 отметки.

Существует необходимость сброса пойманной пыли (очистки пылеуловителя) для его дальнейшей работы. Учитывая значительные объемы пыли, которые необходимо будет

улавливать, сами пылеуловители целесообразно установить на конвейерах, транспортирующих руду, а очистку пылеуловителя от пыли осуществлять непосредственно на конвейер.

Поэтому на базе созданной расчетной модели копра было проведено моделирование работы описанных пылеуловителей – по одному на каждую пару аэродинамически связанных бункеров. При этом отсос запыленного воздуха происходил прямо из внутреннего пространства станка копра. Мощность каждого пылеуловителя была задана равной 1250 м³/мин. В остальном же вариант был полностью аналогичен предыдущему – ВГП находится под землей и обеспечивает расход воздуха по стволу 12000 м³/мин, вентиляционный канал открыт, ворота копра закрыты. Результаты численного моделирования приведены на рисунке 7.24.



Рисунок 7.24 – Вариант воздухораспределения в копре в случае установки пылеуловителей суммарной мощностью 2500 м³/мин при закрытых воротах копра

Видно, что за счет работы пылеуловителей общее количество воздуха, поступающего в копер, стало больше как раз на величину количества воздуха, всасываемого пылеуловителями. Соответственно воздухораспределение меняется таким образом, что вопреки ожиданиям в верхней части копра (выше отметки +53 м) движение воздуха сохранило восходящее направление. Поэтому попытка таким образом решить проблему не приводит к положительным результатам. Дальнейшее увеличение мощности нежелательно, так как увеличение мощности пылеуловителя неизбежно связано с увеличением его габаритных размеров и массы, что в известной мере осложняет и вообще делает невозможным процесс их монтажа и работы.

Вариант удаления запыленного воздуха с участка разгрузки скипов (отметка + 42 м) при разгерметизации отметки копра 0 м.

Второй вариант, при котором возможно создание нисходящей струи на участке выше +53 м, это уменьшение количества воздуха, поступающего выше отметки +26 м, при этом не меняя мощности самих пылеуловителей. Это можно осуществить, в частности, путем создания отверстий в стенке копра на участке отметок 0 +26 м. Простейший вариант, который удовлетворяет описанным требованиям – открыть в копре ворота на нулевой отметке.

Описанная ситуация была промоделирована, результаты численного эксперимента представлены на рисунке 7.25.



Рисунок 7.25 – Вариант воздухораспределения в копре в случае установки пылеуловителей суммарной мощностью 2500 м³/мин при открытых воротах копра

При выходе из вентиляционного канала поток воздуха обладает значительным динамическим напором за счет большой скорости движения, в связи с этим полностью выйти через открытые ворота не может. Этим обусловливается наличие значительного количества воздуха, поступающего в верхнюю часть копра, что в итоге и ответственно за сохранение восходящего движения воздуха в верхней части копра.

Дальнейшее увеличение мощностей пылеуловителей нецелесообразно, так как это значительно увеличит их габаритные размеры, энергоемкость, что, в свою очередь, приведет к невозможности их монтажа и эксплуатации. Поэтому рассмотрены другие варианты решения проблемы.

Вариант удаления запыленного воздуха с участка разгрузки скипов (отметка + 42 м) непосредственно из бункера. Третий вариант - производить отсос пыли непосредственно из бункера, поскольку именно там образуется большая часть пыли. Однако для этого необходимо определить расположение всасывающей трубы пылеуловителя для каждого бункера. Наиболее подходящим местом расположения всасывающей трубы является непосредственно укрытие течки (см. рисунок 7.26). Это объясняется тем, что весь образующийся объем пылевого воздуха так или иначе выходит из бункера через течку. Поэтому, если осуществлять отсос воздуха непосредственно в укрытии течки, можно гарантировать практически полный отсос запыленного воздуха, образующегося и вытесняемого из бункера. Поскольку при разгрузке скипов задействованы все четыре течки бункеров (а, следовательно, с некоторой периодичностью происходит движение запыленного воздуха из каждой), то необходимо организовать отсос воздуха из каждой течки.

Необходимо также определить мощность пылеуловителей, то есть, какое количество воздуха Q_п будет отсасываться из течки через трубопровод.



Рисунок 7.26 – Схематичное изображение места отсоса пылевого воздуха из течки

Минимум, что должна обеспечивать установленная система – это справляться с объемом воздуха, вытесняемым из бункера при разгрузке скипов. Как ранее было вычислено, максимальный расход вытесняемого запыленного воздуха из бункера равен 70 м³/мин. В то же время, как уже отмечалось, образование пыли происходит из-за возникновения просыпей руды во внутреннее пространство станка копра при разгрузке скипов. При этом пыль подхватывается восходящим потоком воздуха и переносится в верхнюю часть копра. Расчет базового варианта показал, что выше интересующей нас отметки +53 м уходит примерно 681 м³/мин воздуха, которые, заметим, в итоге могут быть ответственны за перенос пыли в помещения электрических машин. На этом основании можно утверждать, что дополнительно пылеуловители должны отсасывать 681 м³/мин. Тогда максимально возможное полное количество воздуха, которое необходимо будет отсасывать через все четыре трубопровода пылеуловителей, можно определить как:

$$Q_{\text{max}} = 681 + 4 \times 70 = 961 \approx 1000 \text{ м}^3$$
/мин.

Таким образом, необходимый расход отдельного трубопровода равен одной четверной части рассчитанного значения, то есть 250 м³/мин.

Предложенная модель установки мест пылеотсоса с рассчитанными параметрами реализована в базовой расчетной модели копра, что позволило провести численные эксперименты и оценить ее эффективность.

Геометрически модель описанного варианта представлена на рисунке 7.27.



Рисунок 7.27 – Изображение внутреннего пространства копра на отметках +43 - +48 метров с изображенными течками для разгрузки скипов, укрытиями каждой и подведенными трубопроводоми пылеотсосов

На рисунке 7.28 представлены результаты численного эксперимента распределения воздушных потоков на участке, заключенном между отметками +26 - +53 м.





Последний вариант является наиболее эффективным для данных конкретных условий. Предложенная система, во-первых, позволяет полностью исключить вытеснение запыленного воздуха из бункера, во-вторых, позволит удалять часть запыленного воздуха из станка копра.

7.9 Реализация технических решений по снижению концентрации пыли в башенном копре скипо-вентиляционного ствола

С использованием рекомендаций и материалов исследований на руднике проведен целый комплекс мероприятий, позволивший нормализовать ситуацию. С целью снижения внешних утечек воздуха вентиляторы главного проветривания ствола № 3 были размещены под землей на горизонте -440 м, что, помимо снижения внешних утечек воздуха, привело к изменению направления движения воздушного потока в копре и созданию избыточного давления в башенном копре, что, в свою очередь, обеспечило частичное «запирание» пылевого облака в бункере при разгрузке скипа. Подтверждением этого служат результаты замеров, проведенных в башенном копре при размещении главных вентиляторных установок на горизонте -440 м.

Оценка пылевой обстановки в комплексе разгрузки скипов в условиях избыточного давления. Как уже было сказано выше, при разгрузке скипа происходит срыв пыли с разгружаемой руды потоками воздуха и поступление из бункера пылевого облака, образующегося в результате избыточного давления в бункере, создаваемого разгружающейся рудой.

В настоящее время вентиляторы главного проветривания (ВГП) расположены в подземной части рудника, что обусловливает движение воздушных потоков в башенном копре снизу вверх (рисунок 7.29).



Рисунок 7.29 – Схема движения пылевоздушных потоков в башенном копре при работе подземных ВГП Для определения концентрации взвешенного аэрозоля, образующегося в момент

разгрузки скипа, проведены измерения концентрации пыли на отметке +42,6 м, +60 м и на отметке 0 м. На рисунках 7.30–7.31 представлены схемы размещения точек замеров на отметках 0 м, +42,6 м и +60 м.





Рисунок 7.31 – Схема точек замера на отметке 0 м

Рисунок 7.32 – Схема точек замера на отметке +42,6 м

На отметке +42,6 м в соответствие с нашими рекомендациями расположены установки системы обеспыливания (рисунок 7.32).

В связи с этим замеры концентрации пыли были проведены в двух режимах (с работающей системой обеспыливания и при отключённой системе). В таблице 7.5 представлены результаты замеров при работе подземных и отключенном поверхностном ВГП,

а также представлены результаты измерения концентрации пыли при проветривании рудника за счет поверхностного ВГП.



Рисунок 7.32 – Установки системы обеспыливания

Таблица 7.5 — Результаты замеров концентрации пыли в копре ствола № 3 при отключенном ВГП

Наименование места отбора	Температура, ⁰ С	Влажность, %	Концентрация взвешенного аэрозоля, мг/м ³ (средняя)	ПДК, мг/м ³			
В работе поверхностный ВГП							
Отметка 0 м	9,9	60	50,1	5			
Отметка +42,6 м	12,1	50	58,4	5			
В работе подземные ВГП (пылеуловители запущены)							
Отметка 0 м	15,6	56	6,05	5			
Отметка +42,6 м	16,6	61	8,3	5			
Отметка +60 м	17,4	64	12,2	5			
В работе подземные ВГП (пылеуловители не в работе)							
Отметка 0 м	15,6	56	11,25	5			
Отметка +42,6 м	16,6	61	13,5	5			
Отметка +60 м	17,4	64	16,8	5			

На рисунке 7.33 представлено сравнение концентраций пыли при проветривании рудника за счет поверхностного ВГП и подземных ВГП.



Рисунок 7.33 – Сравнение концентраций взвешенного аэрозоля на различных отметках башенного копра при проветривании рудника поверхностным ВГП и подземными ВГП

Как видно из диаграммы, при проветривании рудника с использованием подземных вентиляторов главного проветривания значительно снижается концентрация пыли в башенном копре, так как в связи с размещением ВГП в подземной части рудника в здании башенного копра создается давление, повышенное относительно атмосферного, что, в свою очередь, способствует «запиранию» пылевого облака в бункере при разгрузке скипа.

На рисунке 7.34 представлено сравнение концентраций пылевого аэрозоля на различных отметках башенного копра при работающих и отключенных пылеуловителях.



Рисунок 7.34 – Сравнение концентраций взвешенного аэрозоля на различных отметках башенного копра при работающих и отключенных пылеуловителях (режим с отключенным поверхностным ВГП)

Как видно из диаграммы, работа пылеуловителей позволяет снизить концентрацию пыли в воздухе на 25÷45 %. Общая концентрация пыли возрастает с увеличением высотной отметки, что связано с направлением движения воздуха, при этом количественно концентрация пыли значительно меньше, чем при других производственных процессах.

7.9 Выводы

- Наличие соляного аэрозоля в вентиляционном стволе связано с пылевыделением в процессе загрузки скипа в дозаторной камере (при размещении ВГП на поверхности) и с процессом разгрузки скипа в приемный бункер, во время которого в ствол поступает большое количество просыпей руды.
- Исходящие струи с горизонта содержат незначительное количество пылевого аэрозоля. Средняя концентрация пыли в исходящем потоке западного крыла составляет 5,4 мг/м³, восточного крыла – 8 мг/м³, в выработке чистки зумпфа 5 мг/м³.
- 3. 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 -50м яруса соляные наросты начинают образовываться на нижней части расстрелов.
- 4. Разработанная пространственная модель вентиляционного ствола позволяет корректно моделировать аэродинамические процессы обтекания расстрелов воздушными потоками. Проведенные расчеты позволили установить, 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.
- 5. В условиях скиповых стволов калийного рудника целесообразно использовать сухие пылеуловители (оснащенные системами самоочистки) в местах разгрузки скипов в приемный бункер. Производительность пылеуловителя рассчитывается исходя из количества воздуха, проходящего по копру.
- Использование обтекателя треугольной формы снижает потерю давления в стволе на 49 %. Кроме того, применение обтекателей на расстрелах приведет к замедлению образования соляных наростов.
- 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на базе многолетних теоретических исследований и натурных 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 проходческо-очистных 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 метановоздушной 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

246

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 научнопроизводственная проблема по снижению концентраций соляной пыли на рабочих местах горных выработок калийных рудников.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем.

- 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.
- 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.
- В действующих рудниках выполнены экспериментальные исследования динамики микроциркуляционных потоков пылевоздушных смесей в пространстве тупиковой проходческо-очистной выработки при различных способах проветривания.
- 4. Разработана математическая модель тупикового проходческо-очистного забоя, 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.
- 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.
- На основе сетевой модели разработан модуль программного комплекса «Аэросеть», позволяющий моделировать распространение сильвинитовой пыли по шахтной вентиляционной сети.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Аджемян, Л. Ц. Автомодельное решение задачи диффузии пара к зародившейся и растущей в парогазовой среде капле / Л. Ц. Аджемян, А. Н. Васильев, А. П. Гринин, А. К. Казанский // Коллоидный журнал. – 2006. – Т. 68, №. 3. – С. 418–420.
- Александрович, Х. М. Микровключенные газы и влага в природных калийных солях / Александрович Х. М., Павлюченко М. М., Маркин А. Д. и др. // Калийные соли и методы их переработки. – 1963. – С. 82–93.
- 3. Анисимов, Л. А. Условия абиогенного восстановления сульфатов в нефтегазоносных бассейнах / Л. А. Анисимов // Геохимия. 1978. № 11 С. 169–170.
- Аркадов, Ю. К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы / Ю. К. Аркадов; Москва: Физматлит – 2001. – 333 с.
- Бекирбаев, Д.Б. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / Д.Б Бекирбаев., Г.С; Гродель – Москва: Госгортехиздат, 1959. – 499 с.
- Белоусов, В. В. Очерки геохимии природных газов / В. В. Белоусов; Ленинград: изд., ОНТИ-Химтеорет, 1937. – 144 с.
- Богданович, А. В. Разделение минеральных частиц в центробежных полях обогатительная технология будущего. / А. В. Богданович // Горный журнал. – 1997. – №4. – С. 24–27.
- Богданович, А. В. Некоторые закономерности разделения минеральных частиц в центробежном поле. / А. В. Богданович, Д. И. Коган // Сб. тр. ин-та «Иргиредмет» Драгоценные металлы и камни. – 1997. – С. 63–73.
- Бодягин, Н.М. Рудничная вентиляция. Учеб. пособие для горных специальностей вузов / Н. М. Бодягин; Москва: Недра, 1967. – 319 с.
- Брагинский, М. Д. Опыт внедрения пылеподавления пеной при работе комбайнов / М.Д.
 Брагинский, В.Н. Балыков, В.Н. Колосов. // Уголь. 1973. № 9. С. 64–66.
- Бреннер, В.А. Проходческий комбайн «Караганда-7/15» / И.М. Жислин., Г. С. Иконников; Москва: изд., Недра, 1969. 205 с.
- Бурчаков, А.С. Динамика аэрозолей в горных выработках. / А.С Бурчаков, Э. М. Москаленко; Москва: изд., Наука. 1965. 68 с.
- Бут, С.А. Возможности увеличения производительности эксплуатируемых скиповых подъемных установок калийных рудников / С.А. Бут, В. Ю. Зверев, Г.Д. Трифанов // Горное оборудование и электромеханика – 2016. – № 9 (127). – С. 3–8.
- 14. Бухаров, И.И. Исследование запыленности воздуха и разработка основных мероприятий по борьбе с пылью в калийных рудниках: 05.26.00: автореферат диссертации на

соискание ученой степени кандидата технических наук / Бухаров Иван Иванович; ППИ. – 1967. – 19 с.

- Васенин, И. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И. Васенин, Э. Шрагер, А. Крайнов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3, – № 2. – С. 155–163.
- Великанов, М.А. Динамика русловых потоков / М. А. Великанов; Москва: изд. Гостехиздат, 1955. – 28 с.
- Венгеров, И. Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Том 1. Анализ парадигмы / И.Р. Венгеров; Донецк: Норд-пресс, – 2008 – 632 с.
- Внедрение новых средств и методов пылеподавления на угольных шахтах. Отчет ПечорНИУИ, 1963.
- Воеводин, А. Ф. Метод расщепления по физическим процессам для расчета задач конвекции / А. Ф. Воеводин. О. Н. Гончарова // Математическое моделирование. 2001.
 Т. 13, №. 5. С. 90–96.
- Волков, К. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов; Москва: изд. ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.
- Воронин, В. Н. Основы рудничной аэро-газодинамики / В. Н. Воронин; Москва: изд. Углетехиздат, 1951. – 491 с.
- Воронов, П. И. Процессы удаления вредных газов из глухих забоев / П. И. Воронов, М. М. Ольвовский // Сб. науч. тр. МГИ. Под ред. и с предисловием А. А. Скочинского. вып. № 3. Москва. 1937. С. 105—161.
- Гаврыш, В. Т. Пространственные задачи теплопроводности для кусково-однородных структур: 05.13.16: автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Гаврыш Василий; К. Ф.-М. н.-Львов, 1993. – 20 с.
- Газизуллин, Р.Н. Режимы безопасной работы скиповых подъемных установок, оснащенных регистраторами параметров / Г.Д. Трифанов, В. Ю. Зверев // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 1. – С. 26–29.
- 25. Головкин, Г. В. Основные методы борьбы с пылью в очистных забоях за рубежом / Г.
 В. Головкин, А. Л. Лев //Эффективность и безопасная разработка месторождений полезных ископаемых. 1971. –Вып. № 3.
- Грин, Х., Лейн В. Аэрозоли пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн; изд. 2-е. пер. с англ. под ред. Н. А. Фукса- Ленинград: Химия, 1972. 428 с.

- Гуляев, А. К созданию универсальной однопараметрической модели турбулентной вязкости / А. Гуляев, В. Козлов, А. Секундов // Изв. АН СССР, МЖГ. – 1993. – № 4. – С. 66–84.
- Гухман, А.А. Введение в теорию подобия /А.А. Гухман; Москва: изд. Высшая школа, 1973. – 296 с.
- 29. Гухман, А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена / А. А. Гухман Изд., 2-е перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1974.– 327 с.
- Демин, О.Н. Исследование рабочего процесса в эжекторе с малым значением коэффициента эжекции / О. Н. Демин, С.П. Зарицкий // Теплоэнергетика, 1969. № 4. С. 77–79.
- 31. Жарков, М.А. / М. А. Жарков, А. С. Соколов // Журнал "Горная Промышленность", Калийные соли. Ресурсы, добыча, международная торговля №6. 1999.
- Жебровский, С. П. Электрофильтры / С. П. Жебровский; Ленинград: Изд-во Госэнергоиздата, 1950. – 256 с.
- Заричняк, Ю. Интегральное решение уравнения диффузии. Часть 2. Граничные условия второго или третьего рода / Ю. Заричняк, В. Новиков // ИФЖ. – 1978. – Т. 34, № 4. – С. 648–655.
- Комплексное обеспыливание в условиях шахт треста Егоршинуголь. Научные труды / В.А. Зеленкин, А. С. Сахаров, П.А. Колеватов, А.Д. Овсянкин // Изд-во ПермНИИИ. Сб.ХІ, 1968.
- Зеляев, Д.И. Системы орошения повышенной надежности // Угольное и горнорудное оборудование / Д. И. Зеляев, М. Д. Брагинский, В. Н. Колосов. Москва: Изд-во НИИинформтяжмаш, 1974.– С. 25–29.
- Земсков, А. Н. Газоносность пород калийных месторождений / А. Н. Земсков// Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2008. – № 2. – С. 37–44.
- 37. Земсков, А. Н. Генезис природных ядовитых газов калийных солей. Известия высших учебных заведений. / А. Н. Земсков // Горный журнал. 2009. – № 4. – С. 54–60.
- Земсков, А. Н. Изучение газоносности пород новых участков калийных месторождений.
 /А. Н. Земсков // Изв. вузов. Горный журнал. 2008. № 3. С. 27–35.
- Земсков, А.Н. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними / А. Н.
 Земсков, П. И. Кондрашев, Л. Г. Травникова; Пермь: 2008. 414 с.
- 40. Земсков, А. Н. О выделении ядовитых газов на Верхнекамских калийных рудниках / А. Н. Земсков, Г.Д. Полянина, Н.Ф. Красюк // Вентиляция шахт и рудников. Ленинград: ЛГИ, 1979. Вып. 6.– С. 83–86.

- Инструкция по применению систем разработки на Старобинском месторождении. ОАО «Беларуськалий», научно производственное унитарное предприятие «Инстиут горного дела», Солигорск 2018. – 146 с.
- Исаевич, А. Г. Исследование пылевой обстановки в условиях калийного рудника, опыт снижения запыленности атмосферы рабочих мест / А. Г. Исаевич, Д.С. Кормщиков // Известия ТулГУ. Науки о Земле, 2018. – Вып. 4. – С. 60–72.
- 43. 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. – 2015. – С. 264– 266.
- 44. Исаевич, А.Г. Обоснование применимости всасывающего способа проветривания для нормализации пылевой обстановки /А.Г. Исаевич // Горное эхо. 2022.– № 1 (86). С. 133–139.
- 45. Исаевич А.Г. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов/ Л.Ю. Левин, А.Г. Исаевич, М.А. Сёмин, Р.Р. Газизуллин // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 72–75.
- 46. Казаков Б.П. Исследование процессов пылеподавления в калийных рудниках кондиционированием воздуха: 05.26.00: автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Казаков Борис Петрович; ППИ – Пермь, 1973.– 15 с.
- 47. Казаков Б.П. Концентрация взвешенных частиц переменной массы в турбулентном потоке / Б.П. Казаков, А.Е. Красноштейн, Т.А. Самарина // Инженерно-физический журнал. – 1974. – N 4. – С. 139–141.
- Казаков Б. П. Пылеподавление паром при транспортировке калийных удобрений в цехе погрузки Первого Березниковского калийного рудоуправления. / Б. П. Казаков, А. Е. Красноштейн, Т. А, Самарина // Сб. науч. тр. «Разработка соляных месторождений». – 1974. – С. 133–136.
- Карпов, А. М. Естественное проветривание тупиковых выработок / А.М. Карпов. // Труды Новочеркасского политехнического ин-та. Новочеркасск. – 1948. – Т. 16(30). – С. 15–17.
- 50. Карпов, А. М. Исследование пределов проветривания тупиковых выработок диффузией
 / А.М. Карпов // Рудничная аэрология и безопасность труда в шахтах. 1949. № 5. С. 81–88.
- Карпов, А. М. Пылеулавливающая установка с рассредоточенным положением всасывающих патрубков.». / А. М. Карпов, А. Ф. // Горные машины и автоматика. 1973. №5. С. 21–30.
- 52. Качурин, Н.М. Прогноз газовых ситуаций в углекислотообильных шахтах / Н.М. Качурин, И.А. Перелыгин // Экономика XXI века: инновации, инвестиции, образование.
 2016. Т. 4. № 1. С. 63–70.
- 53. Кирин, Б. Ф. К вопросу о влиянии осаждении частиц на эффективность орошения. / Б. Ф. Кирин, А.С. Дремуха // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. 1978–№ 7. С. 10–11.
- 54. Кирпичёв, М.В. Теория подобия / М. В. Кирпичёв; Акад. наук СССР. Энергет. ин-т. Москва: Изд-во Акад наук СССР, 1953. 96 с.
- 55. Климанов, А. Д. Определение скорости движения воздуха, необходимой для выноса осевших в трубопроводе пылевых частиц / А.Д. Климанов // Сб. науч. трудов МГИ. 1956. № 16. С. 32–36.
- Климов, Б. Г. Герметизация скиповых вентиляционных стволов / Б.Г. Климов, Ж.Н. Касылкасов // Горное дело. – 1980. – Вып. 1. – С. 217–221.
- Клячко, Л. С. Основы расчета процессов и аппаратов промышленной вентиляции / Л.С. Клячко; Ленинград: Изд-во Профиздат. – 1962.
- Кобзуненко, А.Г. О коэффициенте гравитационно-турбулентной коагуляции облачных капель. / А Г. Кобзуненко, А.И. Неизвестный // сб. статей: Вопросы физики облаков. – 1986. — 1986. – С. -130–141.
- 59. Кобылкин, С.С. Применение компьютерного моделирования при выборе параметров работы пылеотсоса, встраиваемого в проходческие комбайны / А.Н. Тимченко, А.С. Кобылкин // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 3. С. 21–27.
- Кобылкин, С. С. Классификация систем снижения уровня запыленности рудничной атмосферы тупиковых горных выработок / С.С. Кобылкин, А. Н. Тимченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10–1. — С. 112—123.
- Ковалев В. И. Исследование вентиляции как средства борьбы с пылью на железорудных рудниках Урала: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ковалев Виталий Иванович; Свердл. горный ин-т им. В. В. Вахрушева. – Свердловск, 1962. – 15 с.
- Комаров, В. Б. Рудничная вентиляция. / В. Б. Комаров, Д.Ф. Борисов; Москва-Ленинград: Изд-во ГОНТИ НКТП СССР, 1938. – 454 с.

- Кондрасенко, В. Я. Борьба с запыленностью атмосферы на руднике «Медвежий ручей»/
 В. Я. Кондрасенко, П. П. Костылев, К. Т. Мезенцев // В сб. «Борьба с пылью на открытых горных работах». Москва: Изд-во ИГД им. А.А. Скочинского, 1967.
- 64. Косяченко, Г. Е. Гигиенические основы комплексной оценки добычи калийных руд Беларуси и рационального использования спелеосреды месторождения: 14.00.07: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора медицинских наук: / Косяченко Григорий Ефимович Белорус. гос. мед. ун-т. – Минск, 2004. – 38 с.
- 65. Кравец, В.И. Химический состав пыли, образующийся при проходке выработок калийных шахт / В.И. Кравец, А.В. Слонченко // Безопасность труда в промышленности. 1967. № 7.
- Кравец, В.И. Смачиваемость пыли калийных руд. / В. И. Кравец, А.В. Слонченко, А.Г. Степанов // Вестник Киевского политехнического института. – 1968. – №5.
- 67. Краснов, Г. Д. О скорости падения твердых частиц в вибрирующей вязкой среде. / Г. Д. Краснов, Ю. Р. Маевский // Изд-во АН СССР. Металлургия и горное дело. 1964–№5 С. 179–184.
- 68. Краснокутский, Н.И. Борьба с запыленностью на калийных рудниках неослабленное внимание /Н.И. Краснокутский // Безопасность труда в промышленности. 1967. № 9.
- Красноштейн, А.Е. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников / А.Е. Красноштейн, Г.З. Файнбург; Свердловск: Изд-во УрО РАН, 1992. 242 с.
- Красноштейн, А.Е. Моделирование нестационарных процессов распространения газовых примесей по выработкам в условиях рециркуляционного проветривания / А. Е. Красноштейн, Б.П. Казаков, А.В. Шалимов // ФТПРПИ. – 2006. – №1. – С. 95–101.
- Красноштейн, А.Е. Борьба с пылью на руднике Калушского химико-металлургического комбината при погрузке руды из камер и проходке выработки комбайнами. / А.Е. Красноштейн, А.А. Колеватов. // Изд-во Фонды библиотеки ППИ. – 1972.
- Красноштейн, А.Е. Борьба с пылью на калийных рудниках Верхнекамского месторождения. / А.Е. Красноштейн, Н.А. Трофимов, А.Д. Овсянкин // Изд-во Фонды библиотеки ППИ. – 1973.
- 73. Красноштейн, А.Е. Пылеподавление на проходческих комбайнах с помощью пара низких параметров / А. Е. Красноштейн, Н.А. Трофимов, А.Д. Овсянкин // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1973. – № 10. – (76).
- 74. Крупчак, М.М. Медико-биологические основы безопасности / М. М. Крупчак, Е. А. Киселева; Москва: Академия ГПС МЧС России, –2011. 49 с.

- Кудрявцев Е.В. Моделирование вентиляционных систем / Е.В. Кудрявцев; Москва– Ленинград: Изд-во Госиздат стройлит, 1950. – 192 с.
- 76. Кудрявцев А. А. Исследование и разработка способа пылеподавления воздушномеханической пеной высокой кратности на проходческих комбайнах: 05.311: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кудрявцев, Анатолий Алексеевич; Карагандинский политехнический институт. – Караганда, 2013. – 27 с.
- 77. Кузнецов, В. Д. Поверхностная энергия твердых тел / В. Д. Кузнецов; Гостехиздат, 1954. 117 с.
- 78. Лайгна, К.Ю. О роли турбулентной диффузии и дисперсии при переносе газообразных примесей в шахтных вентиляционных струях и потоках. / К. Ю. Лайгна, Э.А. Поттер // Изд-во ФТПРПИ. – 1988. – № 2. – С. 115–120.
- 79. Левин, Л. Ю. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов / Л. Ю. Левин, А. Г. Исаевич, М. А. Семин, Р. Р. Газизуллин // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 72–75.
- Левин, Л. Ю. Решение задачи оперативного расчета распределения продуктов горения в сети горных выработок / Л. Ю. Левин, Д. С. Кормщиков, М. А. Семин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – №. 12. – С. 179–183.
- Левин, Л.Ю. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии / М. А. Семин, А. В. Зайцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – №. 2. – С. 154–161.
- Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич; Москва: Гос. изд-во физико-математической лит-ры, 1959. – 700 с.
- 83. Левич, В.Г. Теория коагуляции и осаждения частиц аэрозоля в турбулентном потоке газа.
 О коэффициенте улавливания частиц аэрозоля / В.Г. Левич // ДАН СССР 99. 1954. № 6. С. 1041–1044.
- 84. Лесниковский Р.Ф. Основные вопросы гигиены труда при добыче и переработке калийных солей в Солигорском бассейне / Р. Ф. Лесниковский, А. С. Богданович // Тезисы докладов на V съезде гигиенистов, эпидемиологов, микробиологов и инфекционистов Белоруссии. – 1971. – С. 56–57.

- 85. Ломая В.А. Влияние турбулентности на эффективность коагуляции облачных капель. /
 В. А. Ломая, И. П. Мазин, А.И. Неизвестный // Изд-во АН СССР, ФАиО. 1990. Т.26.
 №8. С. 813–819.
- 86. Лоханин К. А. Комплексы оборудования для подземной разработки калийных руд. / К.
 А. Лоханин, В. Ф. Грибов, Л. А. Струев; Москва: Угольное горное оборудование, 1973.
 С. 73–32.
- Лоханин К.А. Проходческий комбайн ПК-8, / К. А. Лоханин, Л.А. Струев, Х. З. Нейтур;
 Изд-во Недра, 1969. 144 с.
- 88. Лужецкая Н.Д. Исследование микроклимата и уточнение методики его расчета для условий калийных рудников: 05.15.02: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лужецкая Нина Даниловна; Пермь. – 1974. – 172 с.
- Мазус М. Г. Тканевые фильтры / М.Г. Мазус; Москва: изд. ЦИНТИХИМНЕТЕМАШ, 1974. – 67 с.
- 90. Мальтер В. Метод и некоторые результаты полуэмпирического описания теплопроводности композиционных материалов / В. Мальтер, Н. Большакова, А. Андреев. // Изд ИФЖ, 1980. – Т. 39. – № 6. – С. 1039—1045.
- 91. 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.
- Медведев И. И. Проветривание калийных рудников / И.И. Медведев; Москва: Изд. Недра, – 1970. – 207 с.
- 93. Медведев И. И. Исследование запыленности рудничной атмосферы на Соликамском калийном руднике и способы борьбы с пылью. / И. И. Медведев, И.И. Бухаров А.Е. Красноштейн // Изд во Фонды библиотеки ППИ. 1964.
- 94. Медведев И. И. Аэрология калийных рудников. / И. И. Медведев, А.Е. Красноштейн; Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1990. – 249 с.
- Медведев И. И. Исследование проветривания очистных и подготовительных выработок 1-го Солигорского калийного комбината. / И. И. Медведев, А.Е. Красноштейн // Изд-во Биб. фонд ППИ. – 1966.
- 96. Медведев, И. И. Исследование и разработка способов борьбы с пылью в условиях рудника 1-го Солигорского калийного комбината. / И. И. Медведев, А.Е. Красноштейн, Н. Г. Лукьянов, А.Д. Овсянкин // Отчет по теме 655. – Биб. фонд ППИ. – 1968.

- 97. Медведев, И. И. Исследование и разработка средств и методов борьбы с пылью на калийных рудниках. / И. И. Медведев, А.Е. Красноштейн, Н. Г. Лукьянов, А.Д. Овсянкин и др. // Изд-во Фонд библиотеки ППИ. – 1970.
- 98. Медведев, И. И. Исследование и разработка способов борьбы с пылью в условиях рудника 1-го Солигорского калийного комбината. / И. И. Медведев, А.Е. Красноштейн, Н.Г. Лукьянов, А.Д. Овсянкин // Отчет по теме 655. Изд-во Биб. фонд ППИ. – 1968.
- 99. Медведев, И. И. Борьба с пылью при работе проходческих комбайнов в калийных рудниках. Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. / И. И. Медведев, Н. Г. Лукьянов, А.Е. Красноштейн, А.Д. Овсянкин // Изд-во ЦНИЭТИ Уголь. № 3. 1971.
- 100. Медведев, И. И. Разработка средств и методов по пылеподавлению при работе горных машин. / И. И. Медведев, Ю. М. Нестеров, В. И. Демина // Изд-во Фонды библиотеки ППИ. – 1969.
- 101. Медведев, И. И. Проветривание подготовительных выработок в условиях 2-го Березниковского рудника Верхнекамского месторождения. / И. И. Медеведев, Н. А. Трофимов, Ю. М. Нестеров // Изд-во Фонды библиотеки ППИ. – 1969.
- 102. Медведев, И. И. Разработка оптимального режима проветривания при проведении эксплуатации горных выработок большой протяжённости / И. И. Медведев, Н. А. Трофимов, Ю. М. Нестеров // Изд-во Фонды библиотеки ППИ. 1967.
- 103. Медведев, И.И. Борьба с пылью на калийных рудниках/ И. И. Медеведев, А.Е. Красноштейн; Москва: Изд-во Недра, 1977. 189 с.
- 104. Медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности: учебное пособие / В.
 М. Усков [и др.]. Воронеж: ВИ ГПС МЧС России. 2016. 201 с.
- 105. Мейсен, Б.Д. Физика облаков / Б.Д. Мейсон; Пер. с англ. Г. Т. Никандровой и В. С. Протопопова; Под ред. В. Г. Морачевского и Е. С. Селезневой. Ленинград: Изд-во Гидрометеоиздат, 1961. 542 с.
- 106. Меняйло, Н.И. Гигиеническая оценка условий труда на глубоких горизонтах калийных шахт / Н. И. Меняйло, А.Е. Красноштейн // Актуальные вопросы краевой гигиены Донбасса и физиология труда в глубоких угольных шахтах. –1972. – С. 35–39.
- 107. Меределин, М.Я. Эффективность пылеулавливающих установок при работе комбайнов. «Караганда-7/15С». / М. Я. Меределин, Ю.П. Волчок, Ю.Н., Доброчасов // Безопасность труда в промышленности. – 1974. – № 7. – 40–41.
- 108. Мустель, П.И. Исследование запыленности воздуха и разработка способов пылеподавления на руднике 2-го Солигорского калийного комбината. / П. И. Мустель,

А.И. Колбин, П.А. Лысенков, М.М. Сметанин, Р.С. Шакиров // Изд-во Биб. фонд ЛГИ. – 1971.

- Насонов, И.Д. Моделирование горных процессов / И.Д. Насонов; Москва: Изд-во Недра, 1978. – 256 с.
- 110. Нестеров, Е. А. Изучение газоносности соляных пород продуктивных пластов в условиях рудника СКРУ-3 ПАО "Уралкалий" / Е. А. Нестеров, М.В. Макаренко // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. 2018. – Т. 1. – С. 183–189.
- 111. Николаева, Н. И. К вопросу о гигиенической характеристике условий труда в калийной шахте / Н.И. Николаева // Вопросы общей и промышленной гигиены. 1966. №. 72. С. 181–185.
- 112. Николаева, Н.И. К гигиенической характеристике вопросу о гигиенической характеристике производства хлористого калия. // Вопросы общей и промышленной гигиены. 1966. №. 72. С. 172–180.
- 113. Осодоев М.Т. Исследование и разработка обеспыливающего комплекса для угольных шахт Якутии: 05.15.02: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Осодоева Максима Тимофеевича, 1976. – 169 с.
- 114. Овсянкин, А. Д. Борьба с пылью на комбайнах в калийных рудниках с помощью водовоздушного душирования / А. Д. Овсянкин, А.Е. Красноштейн, П. А. Колеватов // № 139. Разработка соляных месторождений. 1973. №.139.
- 115. Овсянкин, А.Д. Борьба с пылью на проходческих комбайнах с помощью водовоздушных завес / А.Д. Овсянкин // Технология и безопасность горных работ. 1974. №. 150.
- 116. Овсянкин А.Д. Исследование и разработка способов мокрого обеспыливания в комбайновых забоях калийных рудников: 05.15.02: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук /Овсянкина Аркадия Дмитривича; Пермский политехнический институт. – Пермь, 1975. – 217 с.
- 117. Ольховиков, Ю. П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников / Ю.П.
 Ольховиков; Изд-во Недра, 1984.– 238 с.
- 118. Пинский, В. А. Машинная выемка калийных руд / В. А. Пинский, А. В. Соболь, Д. В. Брусиловский; Ленинград: Химия, 1971. 90 с.
- 119. Полушкин, В.И. Вентиляция: учеб. пособие / В. И. Полушкин [и др.]; Москва: Академия, 2008. 146 с.

- 120. Попов, В.В. Биологическое действие и ПДК калийной пыли в воздухе производственных помещений шахт КХМК. / В. В. Попов, А.С. Дмитроченко, С.Д. Величко // Научный отчет. – 1971.
- 121. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 13 февраля 2018 г.
 № 25 "Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.2.5.3532-18 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны"
- Полянина, Г.Д. Некоторые данные о газоносности соляных пород Второго Соликамского рудника / Г.Д. Полянина, А. Н. Земсков, Н.Ф. Красюк // Вентиляция шахт и рудников. – 1976. –№3. – С. 57–59.
- 123. Проскуряков, Н. М. Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках /Н.М. Проскуряков; Москва: Изд-во Недра, 1980. 263 с.
- 124. Проскуряков, Н. М. Управление газодинамическими процессами в пластах калийных / Н. М. Проскуряков, О. В. Ковалев, В.В. Мещеряков; Москва: Изд-во Недра. – 1988. – 239 с.
- 125. Прохоров, П. С. Влияние влажного дефицита на процессы соударения и слияния водяных капель. / П. С. Прохоров, Л. Ф. Леонов // Коллоидный журнал. 1952. Т. 14. № 1.
- 126. Рабинович, Э.М. Разработка способов борьбы с запыленностью воздуха на Калушском и Стебниковском калийных рудниках /Э.М. Рабинович; Изд-во Фон библиотеки Калушской лаборатории ВНИИГа, 1966.
- 127. Рабинович, Э.М. Борьба с пылью в подземных выработках калийных шахт. / Э. М. Рабинович, Я.М. Шевчук // Изд-во Биб. фонд Калушской лаборатории ВНИИГа, 1970.
- 128. Разин ,А. Н. Обзор современных методик расчета турбулентного перемешивания / А. Н. Разин, Ю. А. Трутнев // "ВАНТ" Серия: Теоретическая и прикладная физика. Выпуск №1. 2008. С. 3–13.
- 129. Регламент технологического производственного процесса «Организация проветривания на руднике СКРУ-3 ПАО «Уралкалий». Пермь – Соликамск: 2019. – 52 с.
- 130. Романченко, С. Б. Комплексное обеспыливание / С. Б. Романченко, В. Н. Тимченко, В. Н. Тимченко, В. Н. Костеренко, Г. А. Поздняков, Ю. Ф. Руденко, В. Б. Артемьев, К. Н. Копылов; Москва: Изд-во Горное дело, 2016. Т. 6 Кн.8. 287 с.
- 131. Самотрясов, М.А. Исследование пылеобразования при различных технологических процессах добычи и переработки руд и разработка мероприятий по обеспыливанию на шахтах Стебниковского калийного комбината. / М. А. Самотрясов, А.В. Слонченко, В.В. Лавринович // Отчет Киевского политехнического института 1964–1966.

- 132. Сахаров, А. С. Новый способ улавливания пыли при выгрузке сыпучих материалов из бункеров. / А. С. Сахаров, В.А. Зеленкин, А.Д. А.Д. Овсянкин // Промышленная очистка воздуха от вредных загрязнений. 1964. –№ 11–64–753/5.
- 133. Сахаров, А. С. Борьба с пылью с помощью пара при выгрузке известняка из бункера / А.С. Сахаров, В.А. Зеленкин, А.Д. Овсянкин // Научные труды ПермНИУИ. – 1964. – №6. – С. 225–228.
- 134. Сверчкова, Ю. Л. Отравления сероводородом. / Ю. Л. Сверчкова, Д. Ю. Ерошенко, В.А. Бородин // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. Т. 1. С. 566–567.
- 135. Семин, М. А. Исследование оседания пыли калийной соли в горной выработке / М. А. Семин, А. Г. Исаевич, С. Я. Жихарев // ФТПРПИ. – 2021. – № 2.– С. 178–191.
- 136. Скепьян, Н.А. Хронический бронхит у шахтеров Солигорского бассейна / Н. А. Скепьян,
 А. И. Астахов, Р.Ф. Лесниковский // Здравоохранение Белоруссии. 1973. № 9. С. 31–34.
- Скочинский, А.А. Рудничная вентиляция / А.А. Скочинский; Москва: Углетехиздат, 1959. – 632 с.
- 138. Сметанин, М.М. Система обеспечения безопасности по пылевом фактору в калийных рудниках / М.М. Сметанин // Записки Горного института. 2006. Т. 168. С. 37–40.
- 139. Сметанин, М.М. О составе и некоторых специфических свойствах калийной пыли. / М.М. Сметанин, А.Н. Веденин, П.А. Лысенков // Научные труды ЛГИ. Новые исследования в горном деле. –1971.
- 140. Сметанин М.М. Исследование физико-химических свойств калийной и каменно-соляной пылей с целью разработки методов контроля и средств пылеулавливания: дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сметанин Михаил Михайлович; Ленинград, 1973. – 233 с.
- 141. Смолуховский, М. Три доклада о диффузии, броуновском молекулярном движении и коагуляАции коллоидных частиц / М. Смолуховский, А. Эйнштейн; Изд-во ОНТИ. – 1936. – 600 с.
- 142. Соковнин, В.И. Санитарно-гигиеническая характеристика атмосферы рудников комбината Беларуськалий /В.И. Соконин, Е.И. Солодкин, А.Н. Веденин // Вентиляция шахт и рудников. – 1974 вып.1.
- 143. Сологуб, С.Я. Разработка техники и технологии вращательного бурения взрывных скважин в условиях Стебниковского калийного комбината. / С. Я. Сологуб, В.М.

Ткаченко, В.А. Попков, В.С. Зубков // Отчет Днепропетровского Горного института. – 1969.– № 220.

- 144. Специальные мероприятия по безопасному ведению горных работ на руднике СКРУ–3 ПАО «Уралкалий» в условиях «газового режима». Пермь – Соликамск. – 2019. – 97 с.
- 145. Справочник по борьбе с рудничной пылью на угольных шахтах. Каталог справочник. ЦНИЭИ уголь. – Москва. – 1970.
- 146. Справочник по борьбе с рудничной пылью. Под ред. проф. д-ра техн. наук Л. И. Барона; Гос. ком. Совета Министров РСФСР. по координации науч.-исслед. работ. Гос. науч.исслед. ин-т науч. и техн. информации. 1962. – 324 с.
- 147. Средства комплексного обеспыливания горных предприятий/ И. Г. Ищук, Г. А. Поздняков. Москва: Недра, 1991. 252 с.
- 148. Степанов, С. Зависимость коэффициентов теплопроводности упорядоченных двухфазных систем от объёмной концентрации включений / Степанов С. // Теплофизические свойства твёрдых веществ. –1971. – С. 52–58.
- 149. Струтинский Г. М. Гигиена труда при добыче полиминеральной калийной руды: специальность 14.00.07: автореферат дис. ... кандидата медицинских наук / Струтинский Геннадий Михайлович; МЗ СССР. 1-й Моск. мед. ин-т им. И. М. Сеченова – Москва. – 1990. – 22 с.
- 150. Тезисы докладов на Всесоюзной отраслевой научно-технической конференции по борьбе с пылью и профилактике пневмокониозов на предприятиях угольной промышленности. – 1979. – Москва: ЦНИЭИуголь, 1979. - 196 с.
- 151. Толстых, Е.С. К гигиенической характеристике условий труда при добыче сильвинита на Солигорском калийном комбинате /Е.С Толстых // Гигиена труда и профессиональные заболевания. – 1969. – № 4. – С. 34–35.
- 152. Толстых, Е.С. Микроклимат Солигорских калийных рудников и его влияние на самочувствие и работоспособность горнорабочих / Е. С. Толстых, В.И. Соковнин, В.М. Сельсков // Гигиена труда и профессиональные заболевания. –1975. –№ 3.
- 153. Устинов, П. М. Использование скиповых стволов для проветривания шахт / П.М. Устинов // Труды Карагандинского НИИ. – 1984. – Вып. 16. с.
- 154. Файнбург, Г.З. Методы математического моделирования процессов тепломассопереноса в вентиляционных сетях шахт и рудников / Г.З. Файнбург // Разработка соляных месторождений. – 1978. – С. 47–55.

- 155. 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. С. 131–137.
- 156. Файнбург, Г.З. Анализ микроциркуляционных потоков между микрозонами в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания / Г.З. Файнбург, А.Г. Исаевич // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3. – С. 58–73.
- 157. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 г. № 505.
- 158. Федосеев, В. А. Конденсационный рост крупных капель раствора. / В. А. Федосеев, В. А. Ершов // В сб. Физика аэродисперсных систем. 1975. №. 12. С. 3–12.
- 159. Саранчук, В. И. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли. / В.И. Саранчук, В.Н. Качан, В.В. Рекун и др. // Наукова думка. – 1984. – 216 с.
- 160. Фролов, М.А., Подавление пыли в шахтах высоконапорным орошением / М.А. Фролов, Е.Г. Зырянов; Москва, 1976. – 44 с.
- 161. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс; Москва: Изд-во АН СССР, 1955. 244 с.
- 162. Хаджи-Шейх, А. Интегральное решение уравнения диффузии. Часть 1. Общее решение
 / А. Хаджи-Шейх, М. Машена // Теплопередача. 1988. No 2. С. 1–6.
- 163. Хаджи-Шейх, А. Интегральное решение уравнения диффузии. Часть 2. Граничные условия второго или третьего рода. / А. Хаджи-Шейх, Р. Лакшминараянан // Теплопередача. 1988. No 2. С. 7–12.
- 164. Чилашвили, Ш.Е. Исследование пылеобразования и запыленности воздуха в подземных горных выработках и на карьерах КХМК. / Ш. Е. Чилашвили, О.В. Ректиашвили // Издво Биб.фонд ВНИИЮТ ВЦСПС. – 1970.
- 165. Чуденков, В.И. Очистные комбайны / В.И. Чуденков, Н. В. Сурина, В. И. Морозов; Московский государственный горный университет. – 2006. – 648 с.
- 166. Чулаков, П.Л. Эффективность улавливания витающей пыли диспергированной водой / П. Л. Чулаков, И.Н. Мухитов // Изв. вузов. Горный журн. 1975–№ 5. С. 76–78.
- 167. Шакиров Р.С. Гидрообеспыливание при разработке калийных солей комбайнами ПК 8
 / Р.С. Шакиров // Горный журнал. 1973. № 9.

- 168. Шакиров, Р.С. Влияние пылевого фактора на заболеваемость горнорабочих при разработке сильвинита. / Р. С. Шакиров, А.С. Богданович // Новые исследования в горном деле, научные труды ЛГИ. – 1972. –вып. 5. – 1972.
- 169. Шалимов, А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дисс... д-ра техн. наук /А.В. Шалимов; ГИ УрО РАН. – Пермь, 2012. – 329 с.
- 170. Шаповский, С.С. Борьба с угольной пылью с помощью распылительного орошения / С.С.
 Шаповский // О газовыделениях и пылеобразовании в угольных шахтах. 1958. Москва: Изд-во Углетехиздат. Т.VII. 167 с.
- 171. Швырков, И.А. Проветривание глухих забоев после паления / И.А. Швырков // Безопасность труда в горной промышленности. 1934. № 5. С. 5–12.
- 172. Шакиров, А.В. Влияние влажности сильвинитовой руды на пылеобразование /А.В.
 Шакиров //Научные труды ЛГИ, 1972. вып. 5.
- 173. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. Пер. с англ. Е. Г. Коваленко под ред. Н. П. Бусленко. – Москва: Мир, 1972. – 382 с.
- 174. Cai, P. Diffusion and pollution of multi-source dusts in a fully mechanized coal face // Process Safety and Environmental Protection. / P. Cai, W. Nie, Y. Hua [и др.]. // 2018. Т. 118. С. 93 105.
- 175. Colinet, JF. Status of dust control technology on U.S. / JF Colinet, ER. Spencer, RA. Jankowski
 // In: Ramani RV, ed. Proceedings of the Sixth. International Mine Ventilation Congress. –
 1997. pp. 345–351.
- 176. Colinet, JF. Dust control considerations for deep-cut faces when using exhaust ventilation and a flooded-bed scrubber / JF. Colinet, RA. Jankowski //Transactions SME. – 1996.– Vol. 302.– pp. 104-111.
- 177. Colinet, JF. Status of dust control technology on U.S. / JF Colinet, ER. Spencer, RA. Jankowski
 // In: Ramani RV, ed. Proceedings of the Sixth. International Mine Ventilation Congress. –
 1997. pp. 345–351.
- 178. Fields, KG. Evaluation of dust control for deep cut coal mining systems using a machine mounted collector / KG. Fields, DJ. Atchison, RA. Haney // In: Proceedings of the 1990 International Symposium on Respirable Dust in the Mineral Industries. – 1990.– pp. 349–353.
- 179. Gualtieri, C. On the values for the turbulent Schmidt number in environmental flows. / C. Gualtieri, A. Angeloudis, F. Bombardelli, S. Jha & T. Stoesser // Fluids, 2(2). 2017.
- Goldbeck, LJ. Dust control at conveyor transfer points: containment, suppression, and collection / LJ. Goldbeck, AD. Marti //Bulk Solids Handling. – 1996. – 16(3):367-372.

- Goodman, GVR. Variation in dust levels with continuous miner position / GVR. Goodman, JM. Listak //Min Eng. – 1999. – 51(2):53-58.
- 182. Hasheminasab, F. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation / F. Hasheminasab, R. Bagherpour, S.M. Aminossadati // Tunn. Undergr. Sp. Technol. Elsevier Ltd. – 2019. – Vol. – 89. – P. 68 – 77.
- HIItz Ralph, H. Using High expansion foam to control respirable dust. mining Congz / H. HIItz Ralph, I.V. Friel // j.59. – 1973.– n 5.
- 184. Jayaraman, NI. Optimizing continuous miner scrubbers for dust control in high coal seams / NI. Jayaraman, RA. Jankowski, KL. Whitehead // In: Proceedings of New Technology in Mine Health and Safety Symposium. Littleton. – 1992. – pp. 193–205.
- 185. Jayaraman, N I. Modify spray heads to reduce dust rollback on miners / N I. Jayaraman, FN. Kissell, W. Schroeder // Coal Age. 1984. –89(6):56-57.
- 186. Jayaraman, NI. Reducing quartz dust with flooded-bed scrubber systems on continuous miners / NI. Jayaraman, JJ. McClelland, RA. Jankowski //In: Proceedings of the Seventh International Pneumoconiosis Conference (Pittsburgh, PA). – 1988. – pp. 86-93.
- 187. Knight, G. Generation and control of mine airborne dust / G. Knight // Canada Centre for Mineral and Energy Technology. 1980. – Report 80-27E.
- 188. Kruglov, Y. V. Levin L. Y. Zaitsev A. V. Calculation method for the unsteady air supply in mine ventilation networks / Y. V. Kruglov, L. Y. Levin, A. V. Zaitsev //Journal of Mining Science. – 2011. – T. 47. – №. 5. – C. 651 – 659.
- 189. Kurnia, J. Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines / J. Kurnia, A. P. Sasmito, A. Mujumdar // Tunnelling and Underground Space Technology. –2014.
 T. 42. C. 206 215.
- 190. Kurnia, J. C. CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces. Applied Mathematical Modelling. / J. C. Kurnia, A.P. Sasmito & A. S. Mujumdar // 38(14), 3467–3484.
- 191. Landahl, H.D. On the remonal of air-borne drop-lets by human respiratori tract.-Bul / H.D. Landah // Math. Biophys. 1980. Vol. 12. P. 43–56. 2.
- 192. Ludlow, J. Deep cutting key to dust free longwalling / J. Ludlow, RJ. Wilson //Coal Mining and Processing. 1980. – 19(8):40-43.
- 193. Mason, B. J. Cloud-droplet growth by condensation in cumulus / B. J. Mason, C. W. Chien // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1962. – T. 88. – №. 376. – C. 136– 142.

- 194. The formation of large droplets in small cumulus / B. J. Mason, D. K. Ghosh //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1957. T. 83. №. 358. C. 501–507.
- 195. Menter, F. R. (1994), "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal. 1994. vol. 32, no 8. pp. 1598-1605.
- 196. Pialat, X., Simonin O., Villedieu P. Direct coupling between Lagrangian and Eulerian approaches in turbulent gas-particle flows / X. Pialat, O. Simonin, P. Villedieu // Proceedings of the ASME 2006 2nd Joint U.S.-European Fluids Engineering Summer Meeting Collocated With the 14th International Conference on Nuclear Engineering. Volume 1: Symposia, Parts A and B. Miami, Florida, USA. – 2006. p. 527 - 536.
- 197. Poborski, G., Poborski J. Uber die Untersuchungen in Gasfuhrenden Gesteinen im Kujawy-Revier. / G. Poborski, J. Poborski // Vortrag, III Internation. kollogu. Plotzl. Au. sbruche Bergakademie. – 1965. – N 17. –S. 250–252.
- 198. Sasmito, A., Birgersson E., Ly H. Some approaches to improve ventilation system in underground coal mines environment. A computational fluid dynamic study / A. Sasmito, E. Birgersson, Ly H. // Tunnelling and Underground Space Technology. 2013. т. 34. Р. 82–95.
- 199. Schrader, R., Achermann G., Grunt H. Entwicklung von Methoden zur Bestimmung des Gasgehaltes in Salzen / R. Schrader, G. Achermann, H. Grunt Bergakademie. – 1960. – Nr. 10. – S. 543–551.
- 200. Semin, M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts / M. Semin, A. Zaitsev // Thermal Science and Engineering Progress. 2020.
 T. 20. art. № 100760.
- 201. Seibel, RJ. Dust control at a transfer point using foam and water sprays / RJ. Seibel //Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines. 1976. TPR 97. NTIS No. PB 255–440.
- 202. Sherwood, T. K. Mass Transfer between Phases Role of Eddy Diffusion / T. K. Sherwood, B.
 B. Woertz // Industrial & Engineering Chemistry. 1939. T. 31. №. 8. P. 1034–1041.
- 203. Stolle, E. Gasvorcommen in Kallibergwerken des Sudharzgebiets / E. Stolle // Bergbautechnik.
 1954. T. 4. N 1. S. 46–52.
- 204. Strazisar, A.J., Stein P.L., Tomb T.E. Use of control respirable Coal Dust at the point of generazion / A.J. Strazisar, P.L. Stein, T.E. Tomb // Rept.Invest Bur. Mines U.S.Dep/Inter. – 1972.–№ 7628.
- 205. Taylor, G. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe / G. Taylor; 1954 Vol.
 233. № 1155.
- 206. Tomb, T. Suppression and collection of respirable coal dust using Water and Steam. Ann / Tomb Thomas, F. Cheng Lung, Stein L. Richad // Acad. Sei. –1972. – n. 4.– P.724 – 736.

- 207. Torano, J. Auxiliary ventilation in mining roadways driven with roadheaders: Validated CFD modelling of dust behaviour / J. Torano, S.Torno, M. Menendez and M. Gent // Tunnelling and Underground Space Technology. 2011. T. 26. P. 201 210.
- 208. Van Leer, B. Toward the Ultimate Concervative Difference Scheme. IV. A Second Order Sequel to Godunov's Method / B. Van Leer //Journal of Computational Physics. – 1979. –P.101 – 136.
- 209. Wala, A. Mine face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation / A. Wala, S. Vytla, C. Taylor, [и др.]. // Mining Engineering. 2007. T. 59. № 10. P. 49 55.
- 210. Wang, Y. Numerical study on dust movement and dust distribution for hybrid ventilation system in a laneway of coal mine / Y. Wang, G. Luo, F. Geng // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2015. – T. 36. – P. 146 – 157.
- 211. Wang, Z. Numerical investigations of methane flow characteristics on a longwall face Part II: Parametric studies / Z. Wang, T. Ren, Y. Cheng // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – T. 43. – P. 254 – 267.
- 212. Weibel E.T. Morphometry of the human Luns. / E.T. Weibel; Berlin: 1963. 156 p.
- 213. Yu J. Influence of gas outburst dynamic flow on mine ventilation system. / J. Yu, Z.Li & W. Wang // AIP Advances. 2021. 11(7). 075223.
- 214. Yu J. Regularity of Mine Gas Flow Disaster Induced by Gas Natural Ventilation Pressure after Coal and Gas Outbursts. ACS omega. / J. Yu, Z. Li, Y. Liu, Z. Dong & Sun Y. // 6(30). – 19867–19875. – 2021
- 215. Yueze L. Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face. / L. Yueze, S. Akhtar, A. P. Sasmito & J. C. Kurnia // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. –27(4). – 657 – 662.
- 216. Zhang Q. Diffuse pollution characteristics of respirable dust in fully mechanized mining face under various velocities based on CFD investigation / Q. Zhang, G. Zhou, X. Qian [и др.]. // Journal of Cleaner Production. 2018. Т. 184. Р. 239 250.
- 217. Zheng Y. DPM dispersion study using CFD for underground metal/nonmetal mines / Y. Zheng,
 J. Tien // 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium. 2008. P. 487 494.
- 218. Zhou Z. The Influence of Ventilation Arrangement on the Mechanism of Dust Distribution in Woxi Pithead / Z. Zhou, P. Hu, C. Qi [и др.]. // Shock and Vibration. 2018. № 9. Р. 1 13.
- 219. Zimmer, RA. Optimization of overburden drill dust control systems on surface coal mines / RA. Zimmer, SR. Lueck, SJ. –1987. – 155–157.