

На правах рукописи



Накаряков Евгений Вадимович

**ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВЫХ КАМЕР БОЛЬШОГО
СЕЧЕНИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД
БУРОВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ**

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2024

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

Научный руководитель:

Левин Лев Юрьевич

член-корреспондент РАН, доктор технических наук,
заведующий отделом аэрологии и теплофизики «ГИ УрО
РАН» (г. Пермь)

Официальные оппоненты:

Качурин Николай Михайлович

доктор технических наук, профессор кафедры механики
материалов и геотехнологий Федерального государственного
бюджетного учреждения высшего образования «Тульский
государственный университет» (г. Тула)

Кобылкин Александр Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории №2.2
Геотехнологических рисков при освоении газоносных
угольных и рудных месторождений Федерального
государственного бюджетного учреждения науки «Институт
проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.
Мельникова» Российской академии наук «ИПКОН РАН»
(г. Москва)

Ведущая организация:

**Федеральное государственное казенное учреждение
дополнительного профессионального образования
«Национальный аэромобильный спасательный учебно-
тренировочный центр подготовки горноспасателей и
шахтеров» (г. Новокузнецк)**

Защита диссертации состоится «18» октября 2024 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «ГИ УрО РАН» и на сайте <https://permsc.ru>.

Автореферат разослан « » 2024 года

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направить в двух экземплярах не позднее, чем за 10 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты лица, представившего отзыв.

Отзывы необходимо отправлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А.

Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02

E-mail: lserg@mi-perm.ru

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук

Лобанов С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

При отработке полезных ископаемых рудных месторождений наиболее применим буровзрывной способ выемки, который подразумевает использование энергии взрыва для отрыва породы от массива. Погрузка взорванной горной массы производится самоходным горно-шахтным оборудованием с двигателями внутреннего сгорания, что обеспечивает высокую скорость доставки добытой породы и, как итог, высокую производительность и экономическую эффективность. Несмотря на постоянно совершенствующиеся технологии очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, объем поступающих в рудничную атмосферу вредных примесей, содержащихся в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания, достаточно высок. При работе самоходного оборудования с двигателем внутреннего сгорания (далее по тексту – ДВС) в подземных горных выработках существует вероятность загрязнения рудничной атмосферы до значений концентраций выше предельно допустимых, что влечет за собой необходимость эффективного проветривания, обеспечивающего безопасные условия труда горнорабочих. Газовый состав воздуха в подземных горных выработках при работе в них самоходного оборудования с ДВС зависит от организации проветривания выработок. Для обеспечения безопасных условий труда горнорабочих в подземных горных выработках при работе в них самоходного оборудования с ДВС необходимо подавать в выработки достаточное количество свежего воздуха для разжижения до предельно допустимых концентраций газов. Недостаточность свежего воздуха в подземных горных выработках при работе в них самоходного оборудования с ДВС приводит к превышению предельно допустимых концентраций ядовитых газов в атмосфере выработки, что в свою очередь влечет за собой невозможность ведения горных работ в выработке.

Одной из актуальных проблем рудничной вентиляции является организация проветривания очистных тупиковых камерообразных горных выработок большого сечения, образующихся за счет расширения подготовительной нарезной выработки, при производстве процесса отгрузки взорванной горной массы из очистной выработки самоходным горно-шахтным оборудованием с ДВС.

Большой вклад в исследование проветривания выработок большого сечения внесли Медведев И.И. и Красноштейн А.Е. Коллектив авторов выделил принципиальное отличие процесса проветривания камер от выработок малого сечения – наличие больших масс свежего воздуха в камере и небольшие скорости его движения создают условия, при которых градиент концентрации сохраняется более длительное время и обеспечивается диффузный перенос вещества. Аэрогазодинамика очистных камер на примере сланцевых рудников исследовалась Лайгна К.Ю. На основе теории локальной турбулентности им найдены коэффициенты продольной и поперечной турбулентной диффузии круглых и плоских струй при различных коэффициентах стеснения. Казаков Б.П., Файнбург Г.З., Шалимов А.В. проводили исследования условий проветривания тупиковых выработок, в том числе и большого сечения. Ими определены эффективные условия использования источников тяги для проветривания выработок большого сечения. Также установили, что процесс проветривания тупиковой выработки происходит медленнее, чем это описывает модель идеального смешения, ввиду присутствия в структуре

воздушных потоков отдельных вихрей и застойных зон с пониженным массообменом с другими потоками. В работах Качурина Н.М. проведены исследования проветривания выработок большого поперечного сечения в том числе и тоннелей и установлено, что моделирование аэрогазодинамических процессов при проветривании выработок большого поперечного сечения основывается в общем случае на системе уравнений Рейнольдса, описывающей течение вязкого, сжимаемого теплопроводного газа в трехмерной постановке. Исследования, выполненные в математической модели тупиковой выработки, Пьянниковым В.П. и Росляковым А.С. показали, что реверсирование вентиляционной струи позволяет нормализовать санитарно-гигиенические условия труда в основном участке тупиковой выработки при работе техники с ДВС без увеличения расхода воздуха на проветривание. Также доказано, что проветривание призабойной зоны двумя последовательными струями позволяет снизить количество необходимого для проветривания призабойной зоны свежего воздуха в 2,8 раза. Козыревым С.А. и Амосовым П.В. проводилось численное трехмерное моделирование условий проветривания тупиковой выработки. В частности, ими доказано, что при нагнетательном способе проветривания тупиковых выработок после проведения взрывных работ имеется возможность, по сравнению с требованиями правил безопасности, увеличения минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб с соблюдением нормативного времени на проветривание за счет роста расхода воздуха. Исследования проветривания тупиковых и сквозных выработок по фактору разжижения взрывоопасных газов, выполненные Калединой Н.О. и Кобылкиным С.С., базированы на применении численного трехмерного моделирования. Кобылкиным А.С. неоднократно использовалось численное моделирование для решения задач эффективности проветривания подземных горных выработок по фактору разжижения выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания. Левиным Л.Ю., Газизуллиным Р.Р. и Семиным М.А. использовалось численное трехмерное моделирование для решения задач проветривания тупиковых выработок большого сечения. Ими определены эффективные условия использования источников тяги для проветривания выработок большого сечения, в том числе места наилучшего расположения эжекторных установок для проветривания тупиковых камер большого сечения беструбным способом.

Авторами так или иначе рассмотрены вопросы моделирования проветривания тупиковых горных выработок, однако подробных исследований процесса проветривания тупиковых камерообразных горных выработок длиной более 10 м нет. Данный факт указывает на актуальность исследования условий проветривания и разработки методики расчета и организации проветривания тупиковых очистных камер при отгрузке руды техникой с ДВС.

Цель работы

Разработка безопасных параметров проветривания при отработке запасов тупиковыми очистными камерами буровзрывным способом в условиях изменяющегося объема камерного пространства и развала горной массы.

Основная идея работы

Обоснование способа и параметров проветривания тупиковых камер на основе численного трехмерного моделирования с учетом сложной геометрии камеры и нестационарности источников газовыделений.

Основные задачи работы

1. Провести анализ имеющейся литературы по данной тематике, изучить основные принципы и закономерности образования и переноса газоздушных примесей в выработках.
2. Разработать программу проведения натурных измерений и исследовать в условиях действующих рудников процессы газовыделений самоходного горно-шахтного оборудования с двигателями внутреннего сгорания.
3. Разработать и параметризовать математическую модель проветривания очистных тупиковых выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы самоходным горно-шахтным оборудованием с двигателями внутреннего сгорания.
4. Провести многопараметрическое моделирование процесса проветривания очистных тупиковых выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы с целью выявления факторов влияния на процесс проветривания тупиковых камер.
5. Осуществить корректировку аналитической модели выноса газов в тупиковой выработке с учетом камерного пространства.
6. Разработать методику расчета и организации проветривания протяженных тупиковых очистных камер.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования проветривания тупиковых очистных камер, численное и аналитическое моделирование проветривания, статистическую обработку результатов экспериментальных измерений и численных расчетов, физический и статистический анализ результатов моделирования и экспериментов.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Параметризованная численная модель динамики газоздушной смеси в тупиковых камерах большого сечения с учетом сложной геометрии и нестационарного характера газовыделений позволяет рассчитывать процессы выноса и накопления газов в камерном пространстве.
2. Зависимости динамики концентрации газов в рабочей зоне от параметров технологического процесса отгрузки горной массы с учетом цикличности работы горной техники в выработке, позволяющие определять параметры ее проветривания и организации горных работ.
3. Методика расчета и организации проветривания тупиковых очистных камер, учитывающая максимальное время работы машины по отгрузке, позволяет обеспечить безопасные условия ведения горных работ и сократить издержки на подготовительные работы в пределах панелей.

Научная новизна

- определены закономерности временной динамики концентраций вредных примесей выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания при нестационарной работе дизельной

техники в камерах большого сечения в условиях изменяющегося объема развала горной массы.

- Установлено, что при проветривании тупиковых камер большого сечения формируются два принципиально разнопроветриваемых объема камеры: в пространстве до развала горной массы происходит конвективно-диффузионный перенос газа в воздушной среде за счет кинетической энергии вентиляционной струи, выходящей из воздуховода; в пространстве за развалом происходит диффузионный перенос газа в воздушной среде.
- Предложена аналитическая формула для определения максимального времени нахождения машины в пространстве камеры во избежание превышения предельно-допустимой концентрации в рабочей зоне горнорабочего в зависимости от параметров газовыделения и параметров проветривания.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натуральных измерений, большим объемом экспериментальных исследований в шахтных условиях, положительными результатами верификации валидации разработанных моделей, положительными результатами реализации предложенных решений на рудниках ПАО «ГМК «Норильский никель».

Практическое значение и реализация результатов работы

Полученные результаты исследований позволили оптимизировать применяемые системы разработки ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» в части применения тупиковых камер длиной до 60 м.

Научное обоснование возможности проветривания тупиковых камер длиной до 60 м отражено в разработанных Обоснованиях безопасности Опасного производственного объекта. На разработанные Обоснования безопасности получены положительные заключения экспертизы промышленной безопасности. Указанные заключения внесены в реестр заключений Ростехнадзора.

Результаты работы включены в Регламент технологических производственных процессов «Проветривание горных выработок в подземных условиях подразделений ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

Апробация работы

Научные положения и основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях ГИ УрО РАН «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (Пермь, 2019 г., 2023 г.), на всероссийской научной конференции «Горняцкая смена – 2019» (Новосибирск, ИГД СО РАН, 2019 г.), на всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2019 г.), на конференции международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, ИПКОН РАН, 2022 г.).

Связь работы с крупными научными программами и темами

Исследования по теме диссертационной работы поддержаны Российским научным фондом и Российским фондом фундаментальных исследований в рамках выполнения трех проектов:

- РНФ 19-77-30008 «Разработка теоретических основ и практических методов интеллектуального мониторинга сложных горнотехнических объектов»;
- РФФИ 19-15-50125 «Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников»;
- РФФИ 20-45-596020 р_НОЦ_Пермский край «Исследование динамики гигроскопического аэрозоля калийно-магниевого солей в атмосфере горных выработок калийных рудников».

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024 г.), а также согласно Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук по проекту «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими, геомеханическими и аэрологическими процессами при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (рег. номер ЦИТИС 122012000396-6).

Личный вклад автора

При непосредственном участии автора проведена постановка задач, разработка математических моделей, экспериментальные исследования в шахтных условиях, анализ и обработка полученных данных, теоретические исследования и создание программных продуктов, выполнение расчетов и проведение численных экспериментов, разработка научных решений и их практическая реализация, сформулированы основные научные положения и выводы.

Практические эксперименты и внедрение результатов исследований были бы невозможны без содействия ведущих специалистов ПАО «ГМК «Норильский никель»: Дарбиняна Т.П., Мизонова Е.Н., Мышкина П.И., Кудленко И.Н. и других.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю чл.-кор. РАН, д.т.н. Левину Л.Ю. за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, д.т.н. Зайцеву А.В. и д.т.н. Жихареву С.Я. за консультации и ценные указания, д.т.н. Семину М.А. и к.т.н. Гришину Е.Л. за помощь в выполнении работы. Успешной работе над диссертацией способствовала творческая и доброжелательная атмосфера в коллективе и поддержка коллег.

Публикации

По теме диссертационной работы подготовлено и опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК, 5 в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка и 21 таблицу. Список использованных источников состоит из 153 наименований, в том числе 82 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I научное положение:

Параметризованная численная модель динамики газовой смеси в тупиковых камерах большого сечения с учетом сложной геометрии и нестационарного характера

газовыделений позволяет рассчитывать процессы выноса и накопления газов в камерном пространстве.

В Правилах безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых описан ряд требований по проветриванию тупиковых горных выработок месторождений твердых полезных ископаемых. Согласно п. 160, действующие выработки должны непрерывно проветриваться активной струей воздуха, за исключением тупиков длиной до 10 м, проветриваемых за счет диффузии. А согласно п. 182, расстояние от конца нагнетательного трубопровода до забоя не должно превышать 10 м при площади сечения забоя не более 16 м², а при площади сечения забоя более 16 м² – 15 м. Однако выполнение этих требований в ряде случаев может быть существенно затруднено, – например, для камерообразных выработок, образующихся за счет расширения разрезной выработки при обратном порядке отработки (рисунок 1).

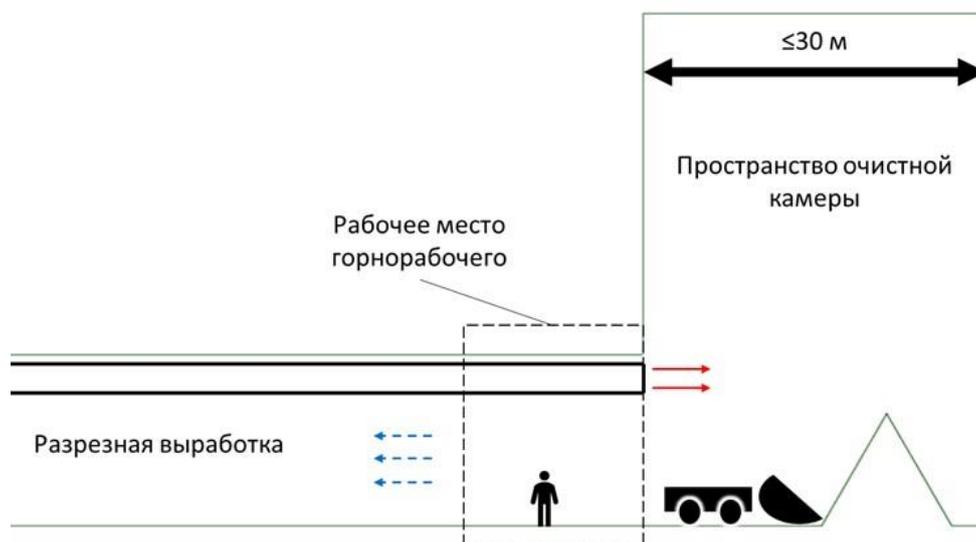


Рисунок 1 – Тупиковая очистная камерообразная горная выработка, образующаяся за счет расширения разрезной выработки, с указанием рабочего места горнорабочего

В данной ситуации длина тупиковой камеры может существенно превышать 10 м, однако при этом технически нет возможности проложить вентиляционный трубопровод в саму камерообразную выработку. Это связано с тем, что забой располагается не в конце, а в начале камерообразной выработки, а значит при проведении буровзрывных работ отбитая горная масса при падении повредит проложенный под забоем вентиляционный трубопровод. Эффективным решением указанной проблемы невозможности прокладки трубопровода в выработанном пространстве камерообразной выработки является разработка специального технологического регламента по проветриванию таких тупиковых выработок, в котором обосновывается правомерность отступления от п. 182 Правил безопасности. Дополнительным и важным нюансом здесь является и нестандартное положение рабочего места машиниста – оно находится не в тупиковой выработке, а в устье камерного пространства (рисунок 1). Машинист при этом осуществляет управление техникой с помощью пульта дистанционного управления.

Для выявления закономерностей распространения газовых примесей выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания в пространстве очистной камеры и прилегающей к ней разрезной выработке были спланированы и осуществлены экспериментальные исследования.

Измерения произведены для девяти тупиковых камер на пяти рудниках ПАО «ГМК «Норильский никель»:

- 10-9-1 подземного рудника «Таймырский»;
- 10-8-2 подземного рудника «Таймырский»;
- 1-1-1 подземного рудника «Комсомольский»;
- КАМ-02-69з-1 подземного рудника «Комсомольский»;
- КАМ-11-15-на_3 подземного рудника «Маяк»;
- КАМ-3Д-2С подземного рудника «Маяк»;
- 11_7-1 подземного рудника «Октябрьский»;
- КАМ-12_15-2 (2ст.) подземного рудника «Октябрьский»;
- 3-17-1 подземного рудника «Скалистый».

В ходе натурных исследований измерены поля скоростей движения воздуха в сечении разрезной выработки и изменение концентраций газа со временем. Измерения произведены с целью выявления особенностей распространения вредных примесей, а также дальнейшей параметризации численной модели проветривания тупиковой камеры. Также в ходе натурных измерений производилось фиксирование времени въезда в камеру и выезда из камеры ПДМ с целью оценки среднего времени пребывания и отсутствия ПДМ, а также для дальнейшей параметризации численной модели.

Измерения полей скоростей воздуха произведены с использованием анемометров по сетке в исследуемом сечении. На рисунке 2 приведены результаты измерения поля скорости для одной из исследуемых камер. Аналогичные поля скоростей построены для всех исследуемых тупиковых камер.

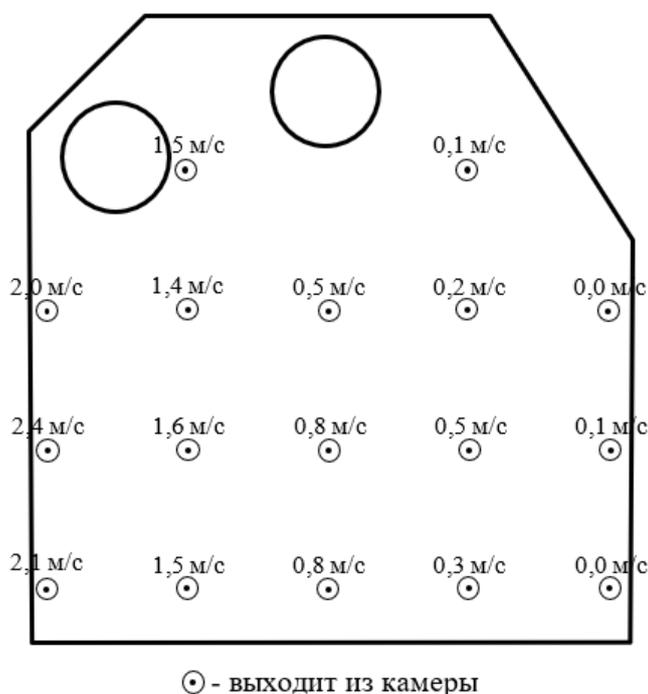


Рисунок 2 – Результаты измерения поля скоростей движения воздуха в исследуемом сечении разрезной выработки КАМ-11-15-на_3 подземного рудника «Маяк»

Измерения концентраций газов произведены с использованием портативных газоанализаторов с возможностью записи показаний в память. На рисунке 3 приведены

результаты измерений для одной из исследуемых тупиковых камер. Аналогичные графики построены для всех исследуемых тупиковых камер для оксидов углерода, оксида азота и диоксида азота.

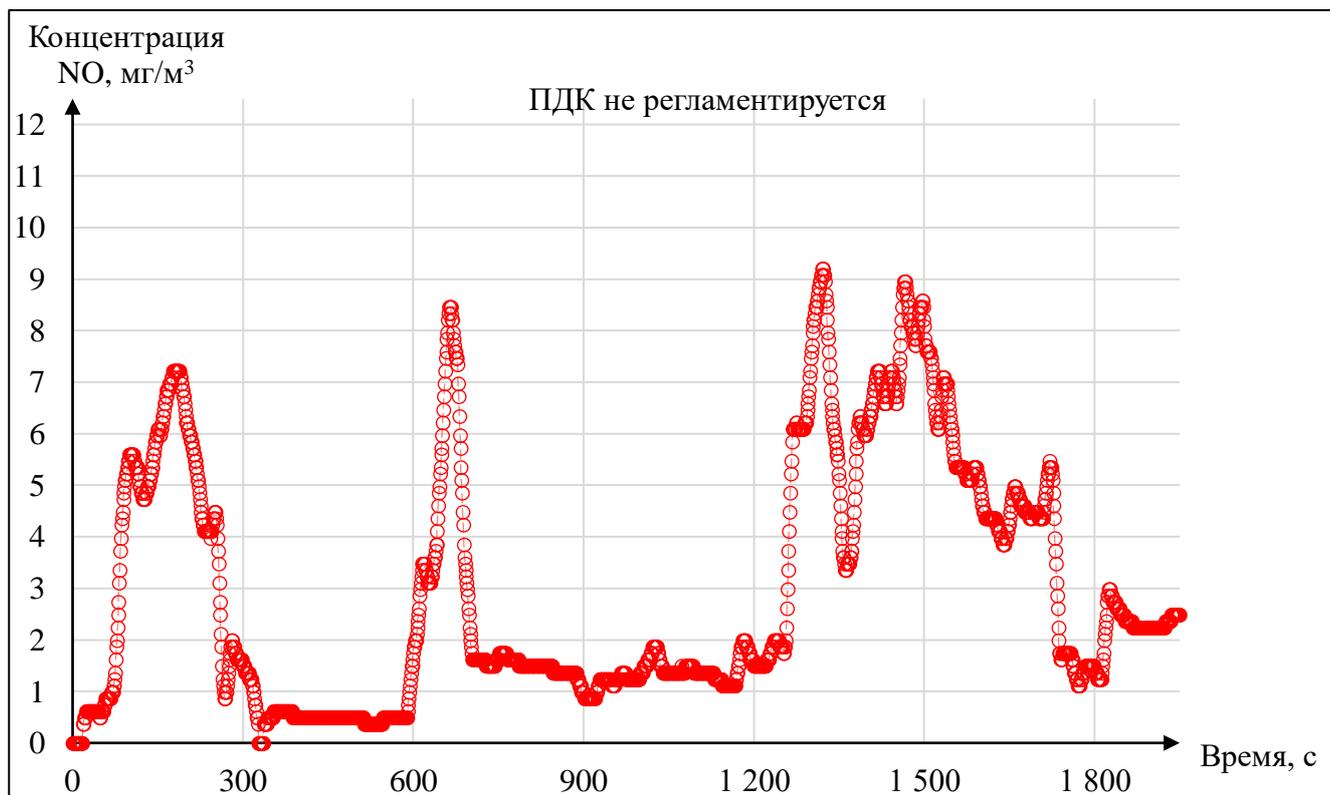


Рисунок 3 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере КАМ-11-15-на_3 подземного рудника «Маяк»

Проведенные натурные измерения качественного состава исходящей струи из тупиковых камерообразных горных выработок свидетельствуют об экспоненциальном характере зависимости возрастания и снижения концентраций в рабочей зоне, что характерно для тупиковых выработок малого сечения.

Произведен анализ данных натурных измерений. Сравнение полученных концентраций с регламентными значениями (таблица 1). По результатам анализа временной динамики концентраций газов (NO, NO₂, CO) в двух из девяти случаев наблюдается превышение ПДК по NO₂, в пяти из девяти – по CO. В качестве возможных причин превышения предельно-допустимых значений отмечены: скопление газов от взрывных работ как в камерном пространстве, так и в отбитой горной массе; также недостаточное количество воздуха, поступающего на проветривание тупиковой камеры.

Таблица 1 – Сравнение полученных в ходе экспериментов величин концентраций с ПДК и возможные причины возникновения превышения

Камера	Превышение предельно-допустимой концентрации		Возможная причина
	по NO ₂	по CO	
10-9-1	нет	нет	
10-8-2	нет	да	скопление газов от ВР в отбитой руде

Камера	Превышение предельно-допустимой концентрации		Возможная причина
	по NO ₂	по CO	
1-1-1	нет	да	недостаточное количество воздуха на проветривание
КАМ-02-69з-1	нет	да	скопление газов от ВР в отбитой руде
КАМ-11-15-НА_3	нет	нет	
КАМ-3Д-2С	да	да	скопление газов от ВР в отбитой руде
11_7-1	нет	нет	
КАМ-12_15-2 (2 ст.)	да	да	скопление газов от ВР в отбитой руде
3-17-1	нет	нет	
Итого:	2 из 9	5 из 9	

Дальнейшие исследования процессов накопления и выноса газов в тупиковых камерах большого сечения произведены с использованием численного моделирования в программном комплексе Ansys. Необходимость разработки численной модели проветривания очистной тупиковой камеры продиктована запретом на нахождение людей в камерном пространстве. При численном моделировании описание движения воздушных потоков базируется на решении основных уравнений гидрогазодинамики, которые выражают фундаментальные физические принципы динамики жидкости и газа: законы сохранения массы, импульса и энергии.

Термодинамическая составляющая физики процесса переноса газозвушной смеси в данной работе не рассматривается ввиду малой локализации, перенос газа от источника до горнорабочего происходит на расстоянии 10-50 м. Исходя из чего можно сделать вывод, что при учете теплового расширения выхлопных газов тепловыделениями в пределах очистного пространства для решения задачи эффективности проветривания тупиковых очистных камер можно пренебречь.

Итоговыми параметрами модели являются: величина шероховатости стенок выработки – 30 мм (соответствует фактически проведенным измерениям); пространственный шаг сетки – 0,5 м, со сгущением вблизи трубопровода до 0,1 м, при временном шаге равном 0,5 с; граничные условия задаются массовыми расходами.

С целью валидации выбранных параметров численной модели произведено моделирование процесса проветривания тупиковых камер, в которых были произведены натурные измерения. Валидация произведена сопоставлением измеренных в ходе натурных исследований концентраций CO, NO и NO₂ с полученными в ходе моделирования.

На рисунке 4 приведены результаты валидации для одной из камер, в которых проведены натурные исследования.

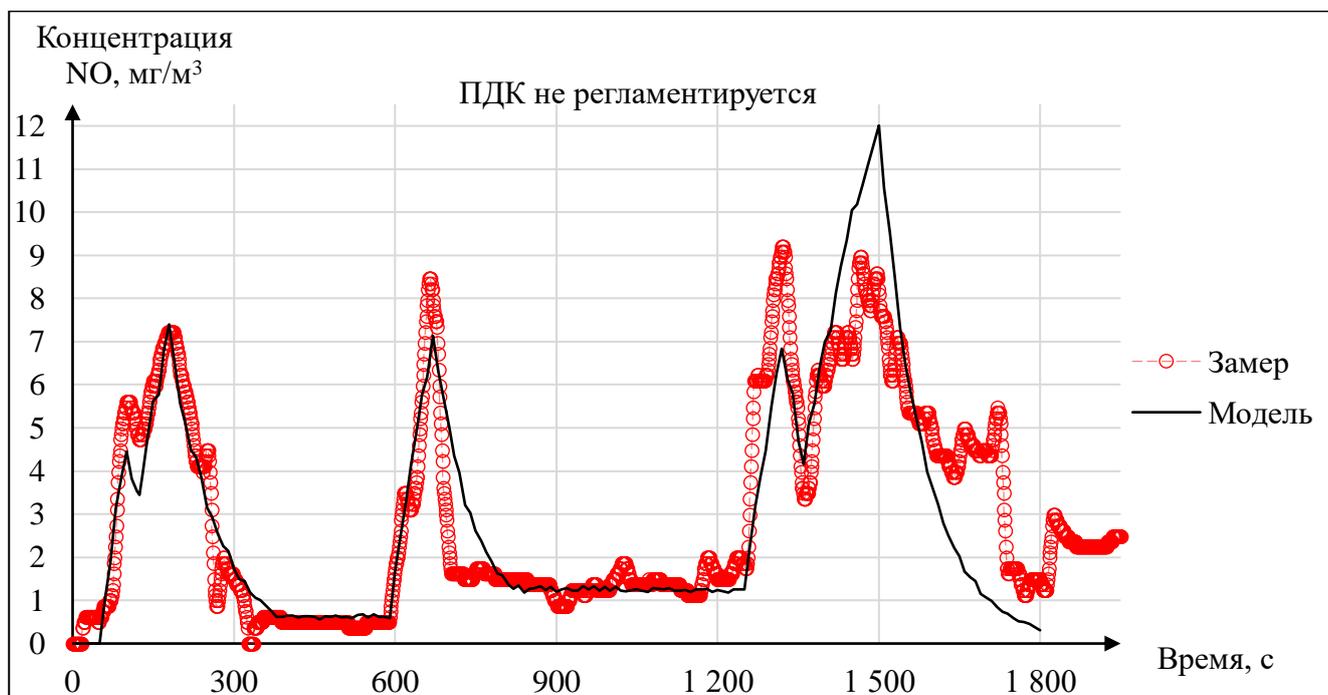


Рисунок 4 – Сопоставление результатов определения концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере КАМ-11-15-НА_3 рудника «Маяк» по натурным измерениям и математическому моделированию

Сопоставление измеренных в ходе натуральных исследований концентраций газов на рабочем месте исследуемых камер с полученными в ходе моделирования произведено сравнением определенных интегралов, максимальный процент отклонения составил 10%.

Разработанная и параметризованная модель процесса проветривания тупиковых очистных выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы позволяет перейти к многопараметрическому моделированию с целью выявления факторов влияния на процесс проветривания выноса газов из очистного пространства.

II научное положение:

Зависимости динамики концентрации газов в рабочей зоне от параметров технологического процесса отгрузки горной массы с учетом цикличности работы горной техники в выработке, позволяющие определять параметры ее проветривания и организации горных работ.

По результатам проведенных натуральных измерений – изменение концентраций газа на рабочем месте машиниста ПДМ имеет кусочно-экспоненциальный вид. В литературе описан вид зависимостей возрастания и снижения концентраций:

$$C_{\uparrow}(t) = \frac{g_{\text{вых}} \cdot C_{\text{вых}}}{k_T \cdot Q_{\text{рз}}} - \frac{g_{\text{вых}} \cdot C_{\text{вых}}}{k_T \cdot Q_{\text{рз}}} \cdot e^{-\frac{k_T \cdot Q_{\text{рз}}}{V_{\text{пр}}} t},$$

$$C_{\downarrow}(t) = C(t_1) \cdot e^{-\frac{k_T \cdot Q_{\text{рз}}}{V_{\text{пр}}} (t-t_1)},$$
(1)

где $g_{\text{вых}}$ – объемный расход выхлопных газов машины; $C_{\text{вых}}$ – концентрация вредных компонентов в выхлопных газах машины; k_T – коэффициент турбулентной диффузии струи; $Q_{\text{рз}}$

– количество воздуха, подаваемого на проветривание; $V_{пр}$ – проветриваемый объем тупиковой выработки; t – время; t_1 – время начала процесса снижения концентрации.

Однако, неизвестны параметры коэффициента турбулентной диффузии и величины проветриваемого объема для случая тупиковых камер большого сечения. С целью нахождения этих параметров производится многопараметрическое численное моделирование. Исследуется влияние геометрических, аэрологических и технологических факторов на проветривание тупиковой камеры.

Произведено моделирование влияния начальной концентрации газа, находящегося в очистном пространстве. Полученные по результатам моделирования зависимости концентрации СО на рабочем месте машиниста от времени работы машины в камерном пространстве аппроксимированы в программном комплексе Wolfram Mathematica. Аппроксимация полученных в результате моделирования данных проводилась с помощью следующей функции по методу наименьших квадратов:

$$C(t) = C_{max} - (C_{max} - C_0) \cdot e^{-\frac{k_T \cdot Q}{V} t}, \quad (2)$$

где C_{max} , C_0 , Q , V – известные параметры; k_T – коэффициент турбулентной диффузии (искомый параметр аппроксимации).

Результаты аппроксимации приведены на рисунке 5.

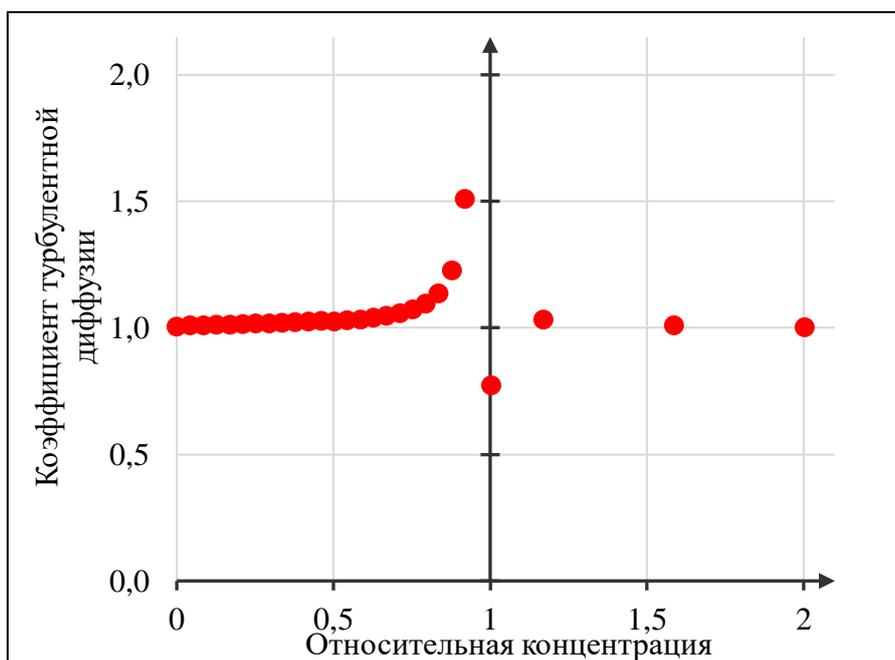


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента турбулентной диффузии от относительной концентрации

Как видно из рисунка при $|C' - 1| > 0,2$ коэффициент турбулентной диффузии близок к единице, при $C' \rightarrow 1$ – устремляется к бесконечности ввиду возрастающей неопределенности процедуры аппроксимации.

Произведена оценка возможности применения коэффициента турбулентной диффузии равного единице при аналитическом расчете концентрации газа от времени. Рассмотрены случаи, когда значение коэффициента сильно больше единицы. Среднее отклонение аналитически

определенных кривых зависимости концентрации газа на рабочем месте машиниста от времени работы машины в камерном пространстве при k_T , определенных по результатам аппроксимации, и $k_T = 1$ в данных случаях составило не более 1 %. Это связано с тем, что при значениях C' близких к единице функция концентрации газа на рабочем месте машиниста от времени работы машины в камерном пространстве $C(t)$ становится достаточно близка к прямой равной $C(t) = C_{max}$. А ввиду присутствия шума от временных колебаний концентрации газа выбор значения k_T практически не влияет качество аппроксимации численных точек зависимостью. Результаты численного моделирования показали, что k_T одинаков для возрастания и снижения концентрации газов от времени. Аналитическая модель должна быть скорректирована на величину начальной концентрации газа, находящегося в очистном пространстве.

Для учета влияния развала руды, формируемого в процессе ведения добычных работ, исследуемая геометрия построена с учетом постепенной отгрузки горной массы, появляющейся вследствие ведения взрывных работ. Смещение развала руды происходит к концу камерного пространства вследствие постепенной отгрузки руды погрузочно-доставочной машиной. Развал руды геометрически представляет собой треугольную призму, т.к. взрывные работы осуществляются в кровлю нарезной выработки, образуя камерное пространство. Высота развала изменяется от 14 м до 0 с шагом в 1 м (дополнительно в диапазоне между величиной развала руды 12 и 14 м – исследовано изменение высоты с шагом 0,25 м). На рисунке 6 показан продольный разрез исследуемой геометрии по оси трубопровода в конечный момент времени.

На рисунке 6 видно, что если при малых высотах развала руды в выработке формируется единый вихрь, проветривающий всё ее пространство, то при достаточно больших развалах руды (9 м и более) ситуация изменяется – за развалом формируется застойная зона, в которой могут существовать один или несколько вихрей с относительно малой интенсивностью переноса массы. Наибольшие концентрации газа наблюдаются в камерном пространстве до развала руды и выносятся в разрезную выработку, где расположено рабочее место машиниста. Но при этом циркулирующий в основном вихре газ, выделяющийся из источника, может попадать в застойную область за развалом руды и находиться там продолжительное время.

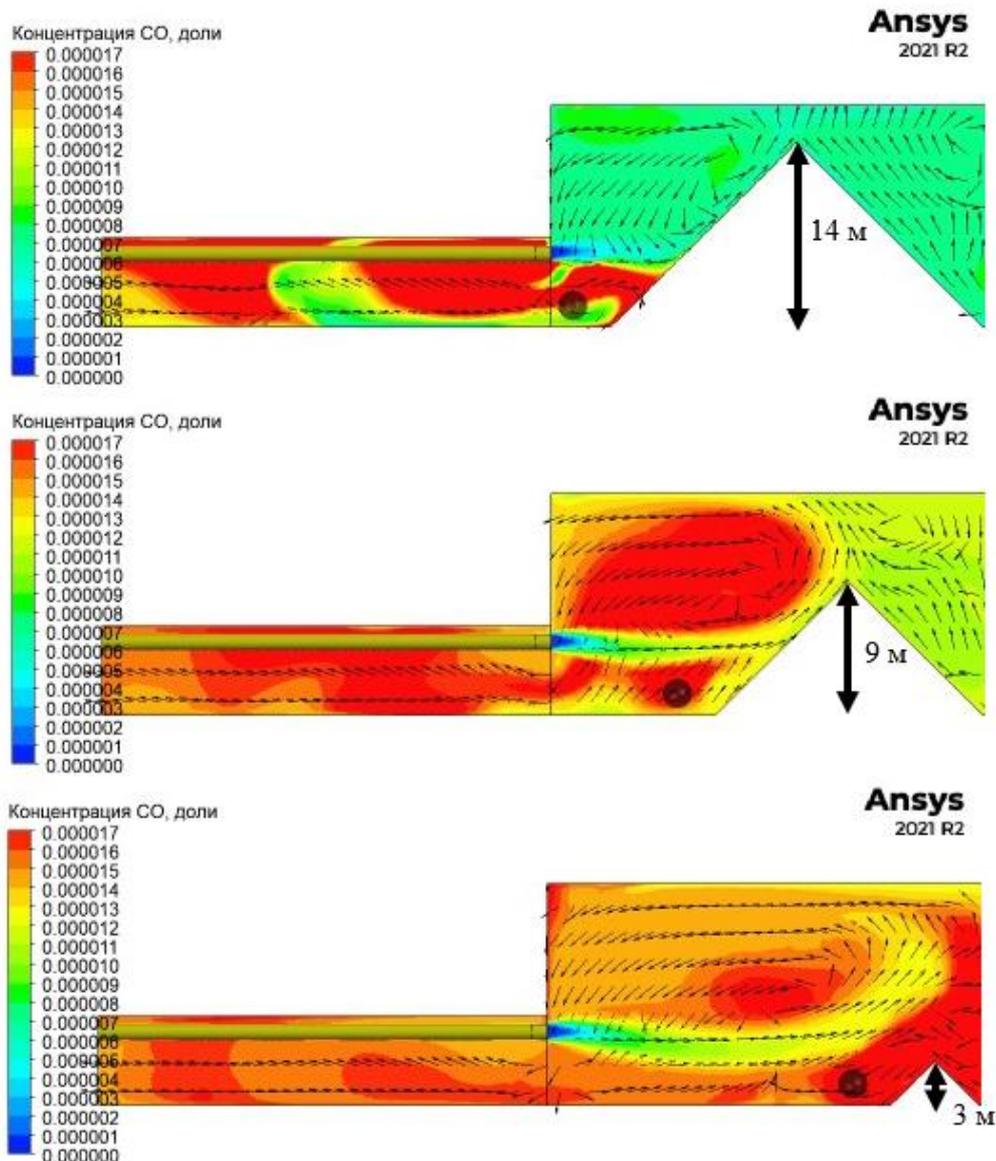


Рисунок 6 – Распределение концентраций СО в продольном разрезе по оси трубопровода для камеры сложной геометрии с развалом руды высотой 14 м, 9 м и 3 м

С целью определения закономерностей возрастания концентраций газа в условиях изменяющегося объема развала руды полученные результаты изменения концентрации вредных компонентов выхлопных газов обработаны на предмет исключения кратковременных колебаний малой амплитуды и далее аппроксимированы в программном комплексе Wolfram Mathematica.

Зависимости концентрации газа на выходе из разрезной выработки аппроксимированы с использованием следующей функции:

$$C(t) = \frac{g_{\text{вых}} \cdot C_{\text{вых}}}{k_T \cdot Q} - \left(\frac{g_{\text{вых}} \cdot C_{\text{вых}}}{k_T \cdot Q} - C_0 \right) \cdot e^{-\frac{k_T \cdot Q}{k_V \cdot V} t}, \quad (3)$$

где $g_{\text{вых}}$, $C_{\text{вых}}$, C_0 , Q , V – известные параметры; k_T , k_V – коэффициент турбулентной диффузии и поправочный объемный коэффициент (искомые параметры аппроксимации).

По результатам аппроксимации полученных значений средней концентрации газа на выходе из разрезной выработки для различных высот развала руды значение коэффициента турбулентной диффузии свободной струи воздуха для условий протяженной тупиковой очистной камеры

рудников Талнахского рудного узла равно единице (при условии подачи требуемого количества воздуха в рабочую зону).

На рисунке 7 представлен график зависимости поправочного объемного коэффициента от отношения высоты развала к общей высоте камеры.

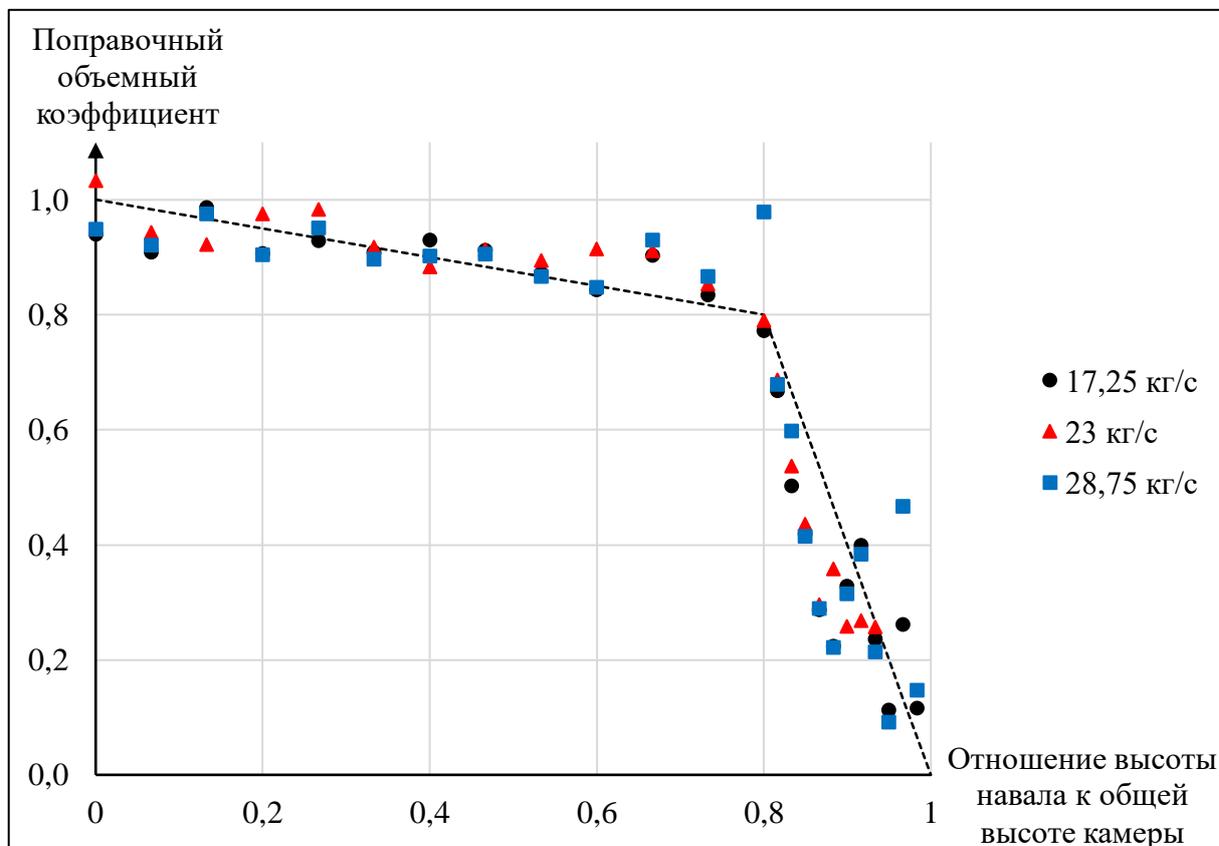


Рисунок 7 – Зависимость поправочного объемного коэффициента от отношения высоты развала к общей высоте камеры при различном количестве воздуха, подаваемого на проветривание

Вид зависимости поправочного объемного коэффициента от соотношения высоты развала руды к общей высоте камерного пространства – кусочная, с разрывом при относительной высоте развала 0,8. Полученные значения аппроксимированы. Определенная зависимость следующая:

$$k_V = \begin{cases} -0,25 \frac{H_H}{H_K} + 1, & \frac{H_H}{H_K} \leq 0,8 \\ -4 \frac{H_H}{H_K} + 4, & \frac{H_H}{H_K} > 0,8 \end{cases}, \quad (4)$$

где H_H – высота развала руды, м; H_K – высота очистного пространства камеры, м.

Необходимо отметить, что относительная высота развала свыше 0,8 на практике имеет достаточно короткий жизненный цикл. Объем развала руды в пределах относительной высоты 0,8÷1 составляет 36% от общего объема руды. Более того, технологический процесс выстроен так, чтобы отгрузка горной массы производилась в течение одной смены. Таким образом, две трети времени работы по отгрузке руды относительная высота развала находится в пределах 0÷0,8.

С учетом первой части полученной зависимости (5) при $\frac{H_H}{H_K} \leq 0,8$ аналитическая модель выноса газов из очистного пространства тупиковой камеры принимает вид:

$$C(t) = \frac{g_{\text{ВЫХ}} \cdot C_{\text{ВЫХ}}}{Q} - \left(\frac{g_{\text{ВЫХ}} \cdot C_{\text{ВЫХ}}}{Q} - C_0 \right) \cdot e^{-\frac{Q}{(-0,25 \frac{H_H}{H_K} + 1) \cdot V} t} \quad (5)$$

Данная зависимость возрастания концентрации газа на рабочем месте горнорабочего получена с учетом геометрических параметров выработки и позволяет перейти к определению максимального времени работы машины по отгрузке руды.

III научное положение:

Методика расчета и организации проветривания тупиковых очистных камер, учитывающая максимальное время работы машины по отгрузке, позволяет обеспечить безопасные условия ведения горных работ и сократить издержки на подготовительные работы в пределах панелей.

Рабочим местом машиниста ПДМ при отработке руды тупиковыми камерами является сопряжение нарезной выработки с камерным пространством. Рабочее место проветривается исходящей из камерного пространства струей воздуха. Для обеспечения безопасных условий труда машиниста ПДМ концентрация газа на его рабочем месте не должна превышать предельно-допустимых значений. Натурные измерения показывают, что при работе машин с ДВС в тупиковых камерах и подаче расчетного количества воздуха по фактору «проветривание от ДВС» наблюдаются превышения предельно-допустимых значений, поэтому время работы машины по отгрузке руды из очистного пространства должно быть ограничено.

Таким образом, расчет требуемого количества воздуха для проветривания рабочей зоны по фактору разжижения вредных компонентов выхлопных газов ДВС остается тем же, что применяется на рудниках ПАО «ГМК «Норильский никель». Дополнительно вводится ограничение на максимальное время работы машины по отгрузке руды из очистного пространства.

Требуемое количество воздуха ($\text{м}^3/\text{с}$) по фактору разжижения вредных компонентов выхлопных газов машин с ДВС определяется по следующей формуле:

$$Q_{\text{ДВС}} = \frac{C_{\text{ВЫХ}}}{C_{\text{ДОП}}} \cdot g_{\text{ВЫХ}}, \quad (6)$$

где $C_{\text{ВЫХ}}$ – концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на NO_2), % по объему; $C_{\text{ДОП}}$ – ПДК по соответствующему компоненту, % по объему для CO – 0,0017 %, для NO_x – 0,00026 %; $g_{\text{ВЫХ}}$ – количество выхлопных газов после очистки, $\text{м}^3/\text{с}$.

Выражение для определения максимального времени работы (в секундах) ПДМ в очистном пространстве камеры принимает следующий вид:

$$t_{\text{max}} = -\frac{V}{Q} \cdot \ln \left(\frac{C_{\text{max}} - C_{\text{ПДК}}}{C_{\text{max}} - C_0} \right) \quad (7)$$

где V – проветриваемый объем камерного пространства, $\text{м}^3/\text{с}$; Q – количество воздуха, поступающего на проветривание, $\text{м}^3/\text{с}$; C_{max} – максимально возможная концентрация газа (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на NO_2); $C_{\text{ПДК}}$ – предельно-допустимая концентрация газа

(оксид углерода, диоксида азота в пересчете на NO_2); C_0 – концентрация газа в поступающей на проветривание струе воздуха (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на NO_2).

Из выражения (7) видно, что при условии $C_{max} < C_{\text{ПДК}}$ (т.е. в рабочую зону подается количество воздуха большее, чем расчетное по фактору проветривания от газов машин с ДВС) время нахождения машины в пространстве очистной камеры не ограничено.

Выражение (7) справедливо при $C_{max} > C_{\text{ПДК}}$ и $C_0 < C_{\text{ПДК}}$, т.е. при увеличении концентрации газов при работающей машине в камерном пространстве. При $C_0 > C_{\text{ПДК}}$ горные работы не осуществляются.

Исходя из симметрии законов увеличения и уменьшения концентрации газов в разрезной горной выработке для полного выноса газа из выработки время выезда машины должно быть не менее времени работы машины по отгрузке руды из очистного пространства ($t_2 \geq t_1$).

Разработанная методика расчета и организации проветривания очистных тупиковых камерообразных горных выработок реализована в рамках модуля «расчет количества воздуха» для рудников ПАО «ГМК «Норильский никель» в аналитическом комплексе «Аэросеть».

The image shows a software window titled "Двигатель внутреннего сгорания" (Internal combustion engine). It contains several input fields and calculated values:

- Описание: Atlas Copco Scooptram ST 1030 (with a link "Выбрать оборудование")
- Мощность: 186000 Вт
- Расход топлива: 198 г/кВт.ч
- Начальный O2: 21 %
- Выхлопные газы заданы на основе: Замеров (dropdown menu)
- Суммарный рабочий объем цилиндров V: 8,9 л
- Скорость вращения коленчатого вала n: 2000 об/мин
- Концентрация на выхлопе: CO: 0,2 %, NOx: 0,08 %
- Максимальное время пребывания: $T_{max} = 297$ с
- Параметры проветривания: Начальная концентрация газа: CO: 0 %, NOx: 0 %
- Ширина камеры: 8 м
- Высота камеры: 15 м
- От трубопровода до места погрузки: 10 м

Рисунок 8 – Окно ввода и вывода параметров проветривания тупиковых камер

На рисунке 8 приведен пример окна ввода геометрических параметров камеры и параметров газовой выделения на основе данных об используемой технике.

В окне программы, приведенном на рисунке 8, в графе «Максимальное время пребывания» выводится максимально возможное время работы техники в камере с параметрами, заданными в программе, при условии подачи расчетного количества воздуха.

На рисунке 8 длина проветриваемого объема камерного пространства вводится в поле «От трубопровода до места погрузки». Это связано с тем, что за развалом формируется застойная зона, в которой могут существовать один или несколько вихрей с относительно малой интенсивностью переноса массы, таким образом проветриваемый объем формируется поперечным сечением камеры и расстоянием от вентиляционного трубопровода до места погрузки руды.

Результаты настоящего исследования легли в основу научного обоснования возможности отступления от требований правил безопасности в части проветривания тупиковых камерообразных горных выработок большого сечения (до 120 м²) длиной до 60 м, указанная величины длины камеры продиктована параметрами применяемой системы разработки на рудниках. Для обеспечения безопасности при отступлениях от требований правил безопасности разработанная методика организации проветривания использована в качестве компенсирующего мероприятия.

На разработанные Обоснования безопасности для пяти объектов ПАО «ГМК «Норильский никель» получены положительные заключения экспертизы промышленной безопасности. Указанные Обоснования безопасности внесены в реестр Ростехнадзора.

Разработанные методики расчета и организации проветривания и обоснования безопасности отражены в Регламенте технологических производственных процессов по вентиляции подземных рудников ОАО «ГМК «Норильский никель». Результаты работы отражены в следующих разделах регламента: «Меры по организации проветривания тупиковых камер», «Меры по обеспечению безопасной эксплуатации машин с ДВС». Результаты настоящей работы позволяют осуществлять добычу тупиковыми камерами длиной до 60 м.

В работе произведена оценка экономической эффективности оптимизации применяемых систем разработки в части применения тупиковых камер до 60 м. По результатам оценки процент снижения проводимых выработок по применяемым на объекте системам разработки составляет от 36% до 66%. Удельная экономия на проходке на выемочную единицу при стоимости м³ проведения выработки 70 тыс. руб. составляет от 11 до 120 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение научно-практической задачи разработки методики проветривания очистных тупиковых камерообразных горных выработок большого сечения, образующихся за счет расширения подготовительной нарезной выработки, во время производства процесса отгрузки взорванной горной массы из очистной выработки самоходным горно-шахтным оборудованием с двигателями внутреннего сгорания и получены следующие основные научные результаты:

1. Проведено исследование процессов газовой выделений самоходного горно-шахтного

оборудования с двигателями внутреннего сгорания в условиях рудников ПАО «ГМК «Норильский никель».

2. Разработана и параметризирована математическая модель проветривания очистных тупиковых выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы самоходным горно-шахтным оборудованием с двигателями внутреннего сгорания.
3. Проведено многопараметрическое численное моделирование процесса проветривания очистных тупиковых выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы.
4. Осуществлена корректировка аналитической модели выноса газов в тупиковой выработке с учетом камерного пространства, позволяющей определять максимальное время работы погрузочно-доставочной машины в очистном пространстве.
5. Разработана методика расчета и организации проветривания протяженных тупиковых очистных камер, внедренная на рудниках Талнахского рудного узла ПАО «ГМК «Норильский никель».
6. Разработаны Обоснования безопасности опасных производственных объектов ПАО «ГМК «Норильский никель». На разработанные Обоснования безопасности получены положительные заключения экспертизы промышленной безопасности. Указанные заключения внесены в реестр заключений Ростехнадзора.
7. Результаты работы включены в Регламент технологических производственных процессов «Проветривание горных выработок в подземных условиях подразделений ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».
8. Приведена оценка экономической эффективности внедрения результатов исследования засчет оптимизации параметров систем разработки.

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

**Публикации в изданиях, утвержденных Высшей аттестационной комиссией при
Министерстве науки и высшего образования РФ**

1. Казаков Б.П., Колесов Е.В., Накаряков Е.В., Исаевич А.Г. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 5–33. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_5
2. Накаряков Е.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Колесов Е.В. Анализ закономерностей накопления и выноса выхлопных газов от машин с двигателем внутреннего сгорания в тупиковых камерообразных горных выработках // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 5. – С. 41-47. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-41-47
3. Накаряков Е.В., Гришин Е.Л., Левин Л.Ю. Исследование процесса проветривания тупиковых очистных камер большого сечения в условиях изменяющегося объема навала руды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. **(принято в печать)**
4. Semin M., Faynburg G., Tatsiy A., Levin L., Nakaryakov E. Insights into Turbulent Airflow Structures in Blind Headings under Different Ventilation Duct Distances **(принято в печать)**

Публикации в других изданиях

5. Накаряков Е.В. Анализ влияния геометрических параметров поперечного сечения очистной тупиковой камеры на эффективность ее проветривания // Горное эхо. Т. 76. № 3 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2019. – С. 76-79. DOI: 10.7242/echo.2019.3.21
6. Накаряков Е.В., Гришин Е.Л. Анализ влияния производственного цикла работы погрузочно-доставочной машины в очистной тупиковой камере на эффективность проветривания // Горное эхо. № 3 (80) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2020. – С. 120-123. DOI: 10.7242/echo.2020.3.23
7. Nakaryakov E. V., Grishin E. L. Ventilation in long blind stopes during operation of load-haul-dumpers with combustion engines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Т. 773. – №. 1. – С. 012077. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012077
8. Kolesov E. V., Nakaryakov E. V. Selection of turbulence model in ventilation modeling for blind stopes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Т. 773. – №. 1. – С. 012071. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012071
9. Накаряков Е.В. Натурные исследования рудничной атмосферы при работе техники с двигателями внутреннего сгорания // Горное эхо. № 4 (85) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2021. – С. 113-118. DOI: 10.7242/echo.2021.4.22
10. Накаряков Е.В. Исследование качественного состава рудничной атмосферы тупиковой горной выработки при отгрузке руды техникой с двигателем внутреннего сгорания // Горное эхо. № 2 (87) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2022. – С. 119-122. DOI: 10.7242/echo.2022.2.19

11. Накаряков Е.В. Исследование влияния тепловыделений техники с ДВС на проветривание тупиковых камерообразных выработок // Горное эхо. № 2 (91) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2023. – С. 110–115. DOI: 10.7242/echo.2023.2.19
12. Накаряков Е.В. Натурные исследования рудничной атмосферы при полном технологическом цикле добычи руды из протяженных тупиковых камер большого сечения // Горное эхо. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2024. **(принято в печать)**

Сдано в печать _____ 2024 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А