На правах рукописи

Трушкова Надежда Анатольевна

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ В СИСТЕМАХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ

Специальность 2.8.6
Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2025

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, доцент, заведующий отделом аэрологии и теплофизики «ГИ УрО РАН» (г. Пермь)
Официальные оппоненты:	**Каледина Нина Олеговна** доктор технических наук, профессор кафедры Безопасности и экологии горного производства Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологических университет «МИСИС» (г. Москва)
	Лугин Иван Владимирович доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск)
Ведущая организация:	**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»** (г. Тула)

Защита диссертации состоится «11» июня 2025 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при «ГИ УрО РАН» по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78 а. С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте https://permsc.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 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 электронная почта лица, представившего его.

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

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук С.Ю.Лобанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Проветривание и воздухоподготовка на современных подземных горнодобывающих предприятиях являются важнейшими технологическими процессами, определяющими безопасность ведения горных работ. На подготовку, подачу и распределение воздуха по горным выработкам приходится до 70 % общих энергетических затрат на горном предприятии, поэтому энергоэффективность систем вентиляции напрямую определяет рентабельность разработки полезных ископаемых.

На сегодняшний день многие горнодобывающие предприятия увеличивают мощности добычи полезных ископаемых как по причине роста потребности мирового рынка в минерально-сырьевых ресурсах, так и по причине снижения содержания полезного компонента в добываемых рудах. Этим обусловлена необходимость подачи дополнительных расходов свежего воздуха, требуемого для нормативного проветривания рабочих зон в условиях роста количества труднопроветриваемых зон и ограниченности пропускной способности вентиляционных стволов.

Одним из известных способов существенного повышения эффективности систем вентиляции горных предприятий является организация частичного повторного использования воздуха на основе рециркуляционного проветривания. Исследованиями и внедрением систем рециркуляции на горнодобывающих предприятиях занимались такие специалисты, как Медведев И.И., Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З., Мохирев Н.Н., Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Круглов Ю.В. и ряд других, за рубежом исследования по данной тематике проводили M.J. McPherson, Josef S. Stachulak, J.P. Saindon и другие.

Несмотря на полученные результаты, свое основное применение рециркуляционное проветривание получило лишь на калийных рудниках, в то время как на рудниках других типов были испытаны только отдельные варианты различных назначений и масштабов, отсутствует методическая база применения стандартных схем рециркуляционного проветривания. Кроме того, невозможность сведения структуры потоков при рециркуляции к классическим схемам типа «дерева», отсутствие жесткого деления струи на «свежие» и «исходящие» требуют расчета не только воздухораспределения, но и газовой (тепловой, пылевой) обстановки путем численного моделирования процессов распространения газовых примесей в сложных вентиляционных сетях, характерных для современных шахт и рудников.

Все это осложняется изменением нормативных документов, не описывающих принципы и методы построения допустимых по требованиям безопасности схем

рециркуляционного проветривания. В этих условиях разработка обоснований безопасности для внедряемых схем рециркуляционного проветривания требует наличия научно обоснованной методики построения безопасных схем рециркуляционного проветривания и соответствующего инструментария.

Поэтому создание методики и инструментов построения эффективных и надежных стандартизированных схем рециркуляционного проветривания представляется весьма актуальным.

Цель работы

Разработка методики построения схем рециркуляционного проветривания для повышения эффективности систем вентиляции подземных рудников.

Основная идея работы заключается в организации частичного повторного использования воздуха в системах вентиляции подземных рудников на основе схем рециркуляционного проветривания, разрабатываемых на основе моделирования и натурных исследований с учетом максимального использования внутренних утечек и непостоянства действия источников газовыделения в сети горных выработок произвольной топологии.

Основные задачи работы:

1. Провести натурные исследования газового состава рудничного воздуха в системах проветривания рудников различного типа и определить факторы, влияющие на безопасность и эффективность рециркуляционного проветривания рабочих зон.
2. Провести натурные исследования внутренних утечек воздуха и аэродинамических параметров систем вентиляции шахт и рудников для параметрического обеспечения расчетов безопасного применения рециркуляционного проветривания.
3. Разработать математическую модель расчета газовой обстановки в сети горных выработок произвольной топологии с учетом продольной дисперсии и наличия рециркуляционных контуров.
4. Разработать стандартизированные схемы рециркуляционного проветривания для типовых схем проветривания рудников и рабочих зон.

5. Разработать методику организации рециркуляционного проветривания подземных рудников произвольного типа с учетом их аэродинамических и газодинамических особенностей.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования газового состава рудничного воздуха в шахтных и лабораторных условиях, обработку результатов экспериментов, математическое моделирование распространения газовых примесей в вентиляционной сети, анализ результатов численных экспериментов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Эффективность рециркуляционного проветривания рабочих зон определяется характером и величинами переменных во времени и в пространстве газовыделений, схемой вентиляции и связанными с ней величинами расходов воздуха и утечек свежего воздуха внутри рециркуляционного контура.
2. Математическая модель конвективно-диффузионного массопереноса в вентиляционных сетях произвольной топологии, учитывающая непостоянство величины продольной дисперсии газа из-за переменной по сечению скорости и взаимодействие воздушных масс в сквозных и примыкающих к ним тупиковых горных выработках, позволяет рассчитывать нестационарное газораспределение в подземных рудниках.
3. Способы организации рециркуляционного проветривания, обоснованные натурными исследованиями и методами математического моделирования, включающие расчет параметров рециркуляции на основе аэродинамических и газодинамических характеристик вентиляционной сети, позволяют повысить безопасность и энергоэффективность вентиляции подземных рудников.

Научная новизна:

— Экспериментально установлены закономерности распределения концентраций газовых примесей по трактам движения воздушной струи в рудниках различных типов.

— Разработано выражение для расчета коэффициента запаса к расчету требуемого количества воздуха с учетом совместного влияния коэффициентов утечек и рециркуляции.

— Предложено описывать процессы смешения в сквозных выработках с помощью модели продольной дисперсии, а в тупиковых выработках с помощью модели продольной диффузии, где коэффициент продольной диффузии определяется по интенсивности вихревого обмена со смежными сквозными выработками.
— Определены схемы эффективной организации рециркуляционного проветривания в привязке к типовым схемам проветривания подземных рудников и их аэродинамическим параметрам.
— Обосновано влияние параметров проветривания и места размещения рециркуляционной установки относительно главных воздухоподающих и вентиляционных выработок на энергоэффективность рециркуляционного проветривания.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натурных измерений, соответствием приведенных результатов данным, полученным другими авторами, и значительным объемом исследований, выполненных в шахтных условиях.

Практическое значение и реализация результатов работы

Полученные в диссертационной работе результаты позволяют выполнять расчеты и проектирование рециркуляционных систем подземных рудников любого типа с соблюдением условия безопасности проветривания.

Результаты исследований применены при разработке и внедрении более 20 рециркуляционных установок на калийных рудниках 1 РУ, 2 РУ, 3 РУ, 4 РУ, Березовском, Краснослободском и Петриковском рудниках ОАО «Беларуськалий» и рудниках БКПРУ-2, БКПРУ-4 и СКРУ-3 ПАО «Уралкалий», что привело к повышению эффективности проветривания добычных участков и значительной экономии электроэнергии на проветривание и воздухоподготовку.

Материалы диссертационной работы использованы при разработке действующих в настоящее время инструкций по расчету требуемого количества воздуха для рудников ПАО «Уралкалий» и ОАО «Беларуськалий».

Также результаты работы использованы при разработке Обоснований безопасности опасного производственного объекта для рудников ПАО «Уралкалий» в части отступлений от пунктов №153, №174 и №653 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных

работ …». На разработанные Обоснования безопасности получены положительные заключения экспертизы промышленной безопасности. Указанные заключения внесены в реестр заключений Ростехнадзора.

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы в рамках проекта «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими, геомеханическими и аэрологическими процессами при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (рег. номер НИОКТР АААА–А19– 119091690020–0), а также в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2030 годы в рамках проекта «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» (рег. номер НИОКТР 122012000396-6). Также диссертационная работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024 г.).

Апробация работы

Основные результаты работы были доложены на международном симпозиуме студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2009 г.), на Всероссийском молодежном форуме «Нефтегазовое и горное дело» (Пермь, ПНИПУ, 2012 г.), на международной конференции «Горная и нефтяная электромеханика» (Пермь, ПНИПУ, 2015 г.), на всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Горняцкая смена» (Новосибирск, 2015 г.), на научных сессиях «ГИ УрО РАН» «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (Пермь, 2015 — 2019 гг.), на международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2014 г., 2022 г.).

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 технологий и технических средств и их практическая реализация, сформулированы основные научные положения и выводы.

Практические эксперименты и внедрение результатов исследований были бы невозможны без содействия ведущих специалистов рудников ПАО «Уралкалий» и ОАО «Беларуськалий».

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.т.н. Левину Льву Юрьевичу за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, д.т.н. Зайцеву Артёму Вячеславовичу за консультации и помощь в выполнении работы, д.т.н., проф. Казакову Борису Петровичу и Казаковой Ларисе Викторовне за ценные указания, д.т.н. Сёмину Михаилу Александровичу и д.т.н. Файнбургу Григорию Захаровичу за консультации и ценные указания. Успешной работе над диссертацией способствовала творческая и доброжелательная атмосфера в коллективе и поддержка коллег.

Публикации

По теме диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе 9 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Минобрнауки РФ, из них 8 в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков и 12 таблиц. Список использованных источников состоит из 116 наименований, в том числе 44 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I научное положение

1. Эффективность рециркуляционного проветривания рабочих зон определяется характером и величинами переменных во времени и в пространстве газовыделений, схемой вентиляции и связанными с ней величинами расходов воздуха и утечек свежего воздуха внутри рециркуляционного контура.

Для оценки распространения газов, определения степени влияния источников газовыделения в вентиляционной сети рудника и оценки возможности применения

рециркуляционного проветривания выполнены измерения концентрации газов. На руднике БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий», рудниках «Скалистый», «Комсомольский», «Таймырский», «Октябрьский» и «Маяк» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», а также рудниках «Ангидрит», «Известняков» и «Заполярный» ООО «Медвежий ручей» были выявлены основные тракты движения воздуха и составлены маршруты измерений газового состава воздуха от воздухоподающего ствола до вентиляционного через удаленные рабочие зоны с наибольшим выделением вредностей. Проведенные исследования показали, что на большинстве исследуемых рудников концентрации газов на исходящих струях не превышают допустимых значений даже в случае отсутствия протекания сорбционных процессов, а превышения концентрации вредных примесей возникают только в ситуациях, связанных с нарушением проветривания. Результаты исследований на примере рудника Октябрьский приведены на рисунке 1.

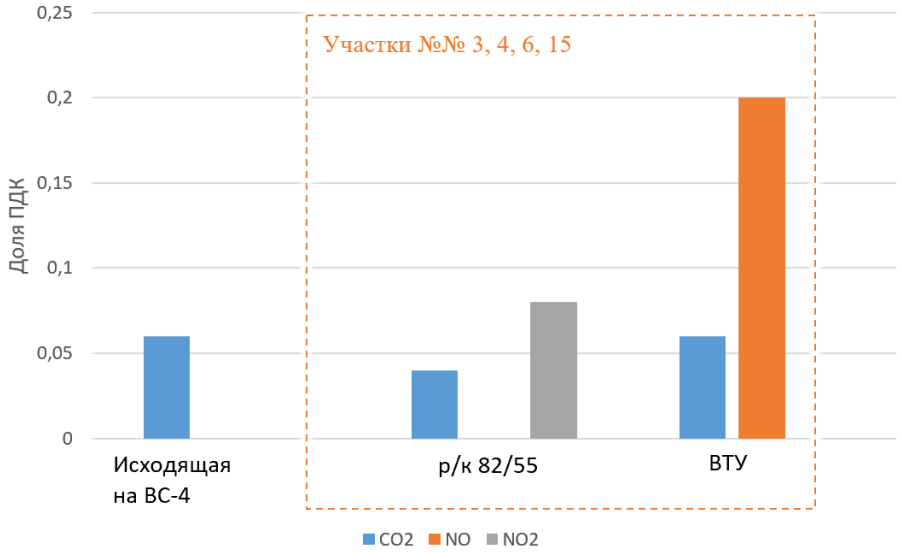

Рисунок 1 — Концентрация газов по маршруту проведения замеров на руднике Октябрьский

Можно выделить следующие причины, приводящие к снижению уровня концентрации газов в исходящей струе воздуха:

1. Наличие коэффициентов запаса к расчету количества воздуха, изначально обеспечивающих разбавление образуемых вредных и горючих примесей до значений ниже предельно допустимых концентраций.
2. Влияние диффузионных процессов, приводящих к снижению пиковых концентраций газа в моменты газовыделения, на общий постоянно подаваемый расход воздуха. По сути, диффузионный механизм позволяет использовать нестационарный характер газовыделений, так как расчет требуемого количества

воздуха производится по максимальному фактору в предположении постоянства его действия.

3. Внутренние утечки воздуха, приводящие к разбавлению исходящей струи воздуха по мере ее движения от рабочих зон по выработкам главных направлений.

Каждый фактор, приводящий к снижению концентрации газов на исходящей струе воздуха, исследован детально.

Пиковые газовыделения, которые могут приводить к приближению концентрации газа на исходящей струе к предельно допустимым значениям, в силу их кратковременности и протекания диффузионных процессов будут стремиться к средним интегральным значениям:

$$\overline{c_2} = \frac{1}{K_з} \cdot \frac{1}{K_{изб}} \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} G(t)\,dt}{G_р(t_2 - t_1)} \cdot c_{ПДК}, \qquad (1)$$

где $\overline{c_2}$ — средняя концентрация газа на исходящей струе после утечек, м^3/м^3; $c_{ПДК}$ — предельно-допустимая концентрация газа, м^3/м^3; $K_з$ — коэффициент запаса на подачу свежего воздуха, учитывающий утечки; $K_{изб}$ — коэффициент запаса на подачу свежего воздуха; $G(t)$ — фактическое газовыделение с учетом цикличности работы оборудования, м^3/с; $G_р$ — расчетное газовыделение, м^3/с; t_2 — время окончания действия источника газовыделения, с; t_1 — время начала действия источника газовыделения, с.

Снижение и выравнивание концентраций будет происходить тем быстрее, чем интенсивнее и дольше протекают диффузионные процессы в рудничной атмосфере. Это подтверждается натурными измерениями, на рисунке 2 приведены результаты замеров концентрации оксида углерода (CO) на руднике «Октябрьский». Для проведения исследования в горных выработках были установлены газоанализаторы с функцией записи на исходящей струе из рабочей зоны, исходящей с участка очистных работ и исходящей с рудника.

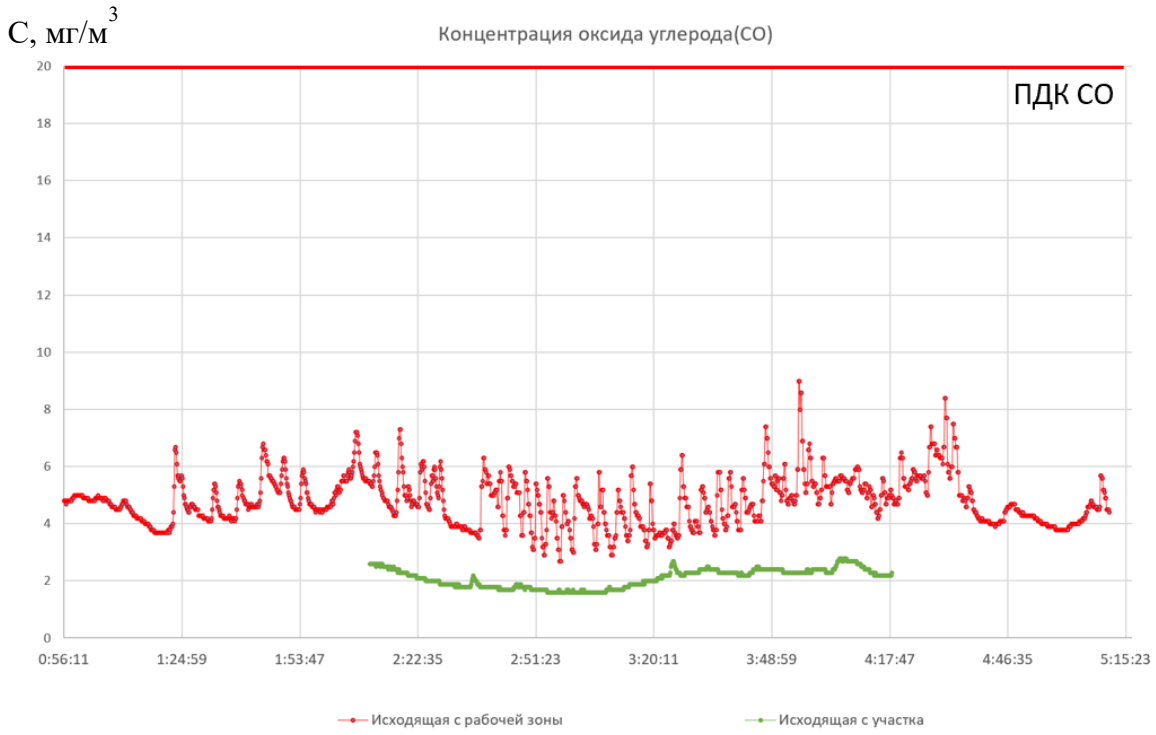

Рисунок 2 — Результат измерений концентрации оксида углерода на руднике Октябрьский

На графике изменения концентрации газа отчетливо прослеживаются пики газовыделений в непосредственной близости от рабочей зоны, связанные с цикличностью работы погрузочно-доставочных машин с ДВС. Далее по пути движения воздуха на исходящей струе с участка прослеживаются менее отчетливые пики, а график концентрации на исходящей струе горизонта к стволу ВС-4 и вовсе выполаживается. Кроме этого, величина концентрации газа снижается по ходу движения воздуха. Все это в совокупности указывает на разбавление исходящей струи воздухом утечек и присутствие процесса диффузии, когда при движении воздуха происходит размывание примесей рудничной атмосферы по длине горных выработок.

Результат натурных измерений величины внутренних утечек воздуха на рудниках приведен на рисунке 3.

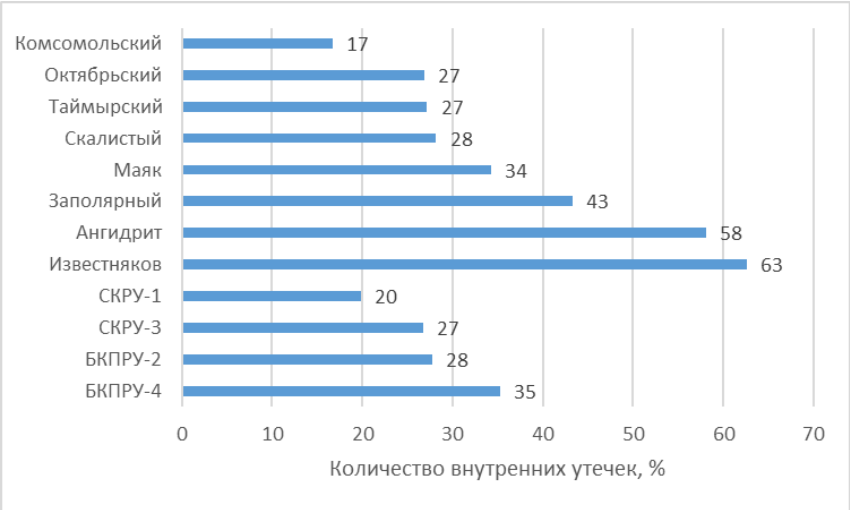

Рисунок 3 — Величина внутренних утечек на рудниках

Газодинамические характеристики участка с рециркуляционной установкой и утечками воздуха можно рассмотреть на упрощенной схеме. На рисунке 4 представлен рециркуляционный контур, включающий одну рабочую зону с расходом воздуха Q_0, постоянный по времени действия и мощности источник газовыделения G, а также утечки воздуха известной величины. В модели выделяется три вида аэродинамических сопротивлений – аэродинамическое сопротивление главных направлений R, аэродинамическое сопротивление выемочного участка $R_к$ (является эквивалентом общего сопротивления двух параллельных ветвей – рабочей зоны и утечек), и аэродинамическое сопротивление рециркуляционной сбойки $R_р$ с соответствующими расходами воздуха на участках. Также в модель введен дополнительный параметр L, зависящий от места размещения рециркуляционной установки. Чем больше данный параметр, тем больше доля аэродинамического сопротивления главных направлений, входящих в рециркуляционный контур. При этом подразумевается, что в данной рабочей зоне определяющим для расчета количества воздуха является газовый фактор.

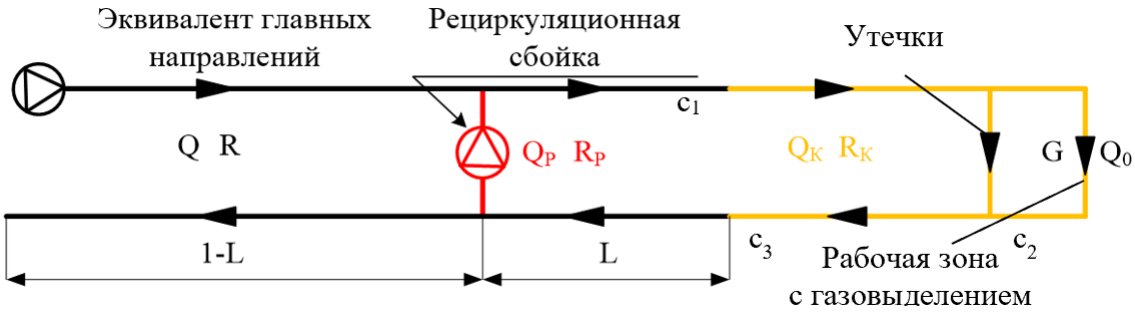

Рисунок 4 — Расчетная схема рециркуляционного контура

Рассмотрев общую схему газового баланса в рециркуляционном контуре, можно записать выражение для определения концентрации газа на исходящей струе:

$$c_2 = G \cdot \frac{Q_к - Q}{Q_к \cdot Q} + \frac{G}{Q}, \qquad (2)$$

где c_1 — концентрация газа в свежей струе после рециркуляционной сбойки, м^3/м^3; c_2 — концентрация в исходящей струе после газовыделения рабочей зоны, м^3/м^3; G — газообильность рабочей зоны, м^3/с; Q – расход свежего воздуха, поступающего в рециркуляционный контур, м^3/с; $Q_к$ – расход воздуха в рециркуляционном контуре, м^3/с.

По выражению 2 видно, что снизить концентрацию газа на исходящей струе возможно за счет увеличения количества свежего воздуха или повторно используемого, а помимо традиционного учета утечек при расчете количества воздуха также следует учитывать ненулевую концентрацию газов в свежей струе воздуха, возникающую при применении рециркуляции, путем введения дополнительного коэффициента запаса к расчету требуемого количества воздуха. Графики для его определения приведены на рисунке 5.

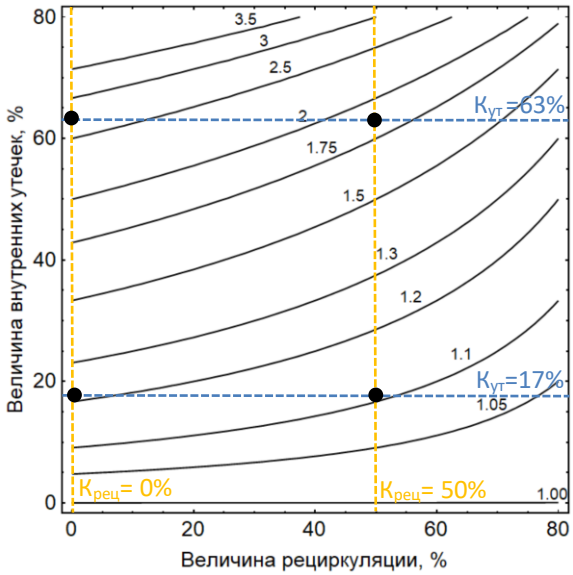

Рисунок 5 — Изолинии коэффициента запаса к требуемому расходу воздуха как функции от величин внутренних утечек и рециркуляции

Рассмотрим в качестве примера результат расчета требуемого количеств воздуха для исследуемых рудников с наименьшим и наибольшим количеством внутренних утечек (рисунок 3), при этом коэффициент запаса к расчету количества воздуха определяется по номограмме, приведенной на рисунке 5.

Результаты расчетов возможного снижения количества подаваемого воздуха в зависимости от величины внутренних утечек и коэффициента запаса к расчету требуемого количества воздуха показали, что допустимое снижение подачи воздуха при коэффициенте рециркуляции 50% составляет 9,09% и 45,9 % для рудников с величиной внутренних утечек 17% и 63% соответственно.

Проведенные в работе исследования показали, что повысить эффективность проветривания возможно за счет применения частичного повторного использования воздуха на рудниках любого типа, путем задействования воздуха утечек и учета всех механизмов снижения концентраций газов в исходящей струе воздуха.

II научное положение

2. Математическая модель конвективно-диффузионного массопереноса в вентиляционных сетях произвольной топологии, учитывающая непостоянство величины продольной дисперсии газа из-за переменной по сечению скорости и взаимодействие воздушных масс в сквозных и примыкающих к ним тупиковых горных выработках, позволяет рассчитывать нестационарное газораспределение в подземных рудниках.

Необходимость разработки данной модели обусловлена тем, что применяемая для расчета газопереноса в вентиляционных сетях модель идеального вытеснения имеет слабую сторону, связанную с нефизичным поведением вредных примесей в горных выработках с низкой скоростью воздуха, которые, как правило, присутствуют в детализированных моделях вентиляционных сетей рудников, также не менее важно учитывать механизм диффузии при большой протяженности тракта и времени движения газовых примесей.

Для решения задачи распространения газов следует знать распределение расходов воздуха и скоростей воздушного потока, которые в рамках разработанного численного метода определяются путем решения системы уравнений, образованной 1-м и 2-м правилами Кирхгоффа:

$$\sum_{i \in A_j} Q_i U_{ij} = 0, \tag{3}$$

$$\sum_{i \in C_k} (R_i Q_i |Q_i| - H_i) Y_{ik} = 0, \tag{4}$$

где Q_i — расход воздуха в ветви i, м^3/с; R_i — аэродинамическое сопротивление ветви i, Н·с^2/м^8; H_i— источник тяги (вентилятор) в ветви i, Па; U_{ij} — индикатор, равный 1, если ветвь i начинается в узле j, и –1, если ветвь i оканчивается в узле j; Y_{ik} — индикатор, равный 1, если ветвь i сонаправлена с направлением обхода контура k, и –1, если ветвь i направлена в противоположную сторону; A_j — множество ветвей, инцидентных узлу j; C_k — множество ветвей, входящих в контур k.

Для расчета переноса объемной концентрации вредной примеси С в горных выработках используется явная по времени конечно-разностная схема и применяется классическое одномерное уравнение:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_{\text{ср}} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D \frac{\partial C}{\partial x}\right) + q, \tag{5}$$

где $V_{\text{ср}}$ — средняя по сечению горной выработки скорость воздуха, м/с; D — эффективный коэффициент продольной дисперсии (диффузии), м^2/с; q — источник вредной примеси, 1/с; t— время, с; x — координата вдоль оси горной выработки, м.

Согласование решений уравнения (5) между смежными ветвями происходит по условию сохранения потока вредной примеси через общий узел. В случае сопряжения M ветвей (по M_{in} ветвям поток заходит в узел, по M_{out} ветвям поток выходит из узла), условие сохранения потока вредных примесей записывается так:

$$\sum_{i=1}^{M_{in}} \Psi_i = \sum_{j=1}^{M_{out}} \Psi_j, \tag{6}$$

$$\Psi = CQ - DS\frac{\partial C}{\partial x}. \tag{7}$$

Здесь Ψ – поток вредных примесей, м^3/с; S – сечение горной выработки, м^2. Индекс i нумерует выработки, по которым примесь поступает в узел, а индекс j – выработки, по которым примесь покидает узел.

Система уравнений дополняется граничными условиями по концентрации вредных примесей в атмосфере ($C_{\text{атм}}$) для внешних узлов (8), для внутренних узлов (9) и начальными условиями по значениям вредных примесей (10) в момент времени $t = 0$:

$$C_i(t, 0) = C_{\text{атм}}, \tag{8}$$

$$C_i(t, 0) = \frac{\Psi_{sum}}{Q_{sum}}, \tag{9}$$

$$C_i(0, x) = C_i^{(0)}(x). \tag{10}$$

Здесь $C_i^{(0)}(x)$ – начальные распределения концентраций в ветвях графа вентиляционной сети; $C_{\text{атм}}$ – концентрация газа в воздухе, поступающем из атмосферы; Ψ_{sum} – поток вредных примесей, проходящий через узел, м^3/с; Q_{sum} – суммарный расход воздуха, проходящий через узел, м^3/с.

Коэффициент продольной дисперсии должен определяться не только скоростью воздушного потока в рассматриваемой ветви i, но и скоростью потока в соседних с ней ветвях. Если к сквозной выработке с относительно высокой скоростью воздушного потока примыкает другая выработка с относительно малой скоростью потока, то на некоторой области последней будет происходить вихревое движение воздушных потоков, приводящее к дополнительному турбулентному перемешиванию вредных

примесей. Для реализации такого подхода следует использовать в (5) пересчитанный коэффициент продольной дисперсии:

$$D^{*}_{i,j} = D_i + \Delta D_i^{in} \exp(-ad_{in}) + \Delta D_i^{out} \exp(-ad_{out}), \quad (11)$$

$$\Delta D_i^{in} = (D_{adj}^{in} - D_i)^{+}, \quad \Delta D_i^{out} = (D_{adj}^{out} - D_i)^{+}, \quad (12)$$

$$d_{in} = x_j, \quad d_{out} = L_i - x_j. \quad (13)$$

Здесь ΔD_i^{in} — разница между продольной дисперсией D_i в рассматриваемой ветви и дисперсией D_{adj}^{in} в смежной с ней (по начальному узлу), м^2/с; ΔD_i^{out} — разница между продольной дисперсией D_i в рассматриваемой ветви и дисперсией D_{adj}^{out} в смежной с ней (по конечному узлу), м^2/с; a — модельный параметр, м$^{-1}$; d_{in} — расстояние от рассматриваемого узла до начала ветви, м; d_{out} — расстояние от рассматриваемого узла до конца ветви, м; $x^{+} = max(0;\ x)$ — обобщенная функция.

Описанный алгоритм протестирован в пакете компьютерной алгебры Wolfram Mathematica 10, рассмотрена задача о проветривании участка вентиляционной сети, состоящего из воздухоподающего и вентиляционного штреков, а также вентиляционной сбойки с перемычкой и относительно низким расходом воздуха. Эффективные диаметры всех ветвей приняты равными 3.9 м, плотности воздуха 1.2 кг/м^3, а коэффициенты аэродинамического сопротивления 0.0044 кг/м^3. Сопротивление перемычки подобрано таким образом, чтобы обеспечить требуемое соотношение расходов в параллельных ветвях 2 и 3.

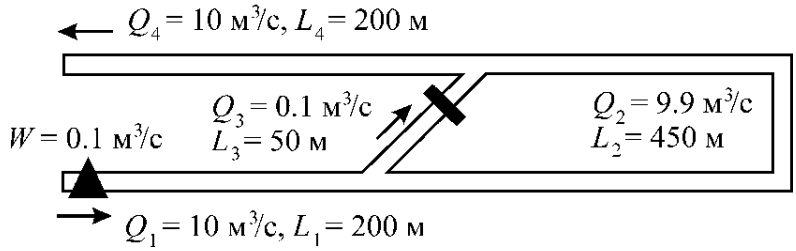

Рисунок 6 — Геометрия участка вентиляционной сети и параметры задачи

На основании расчетов построены графики зависимости концентрации вредных примесей по длине в различные моменты времени.

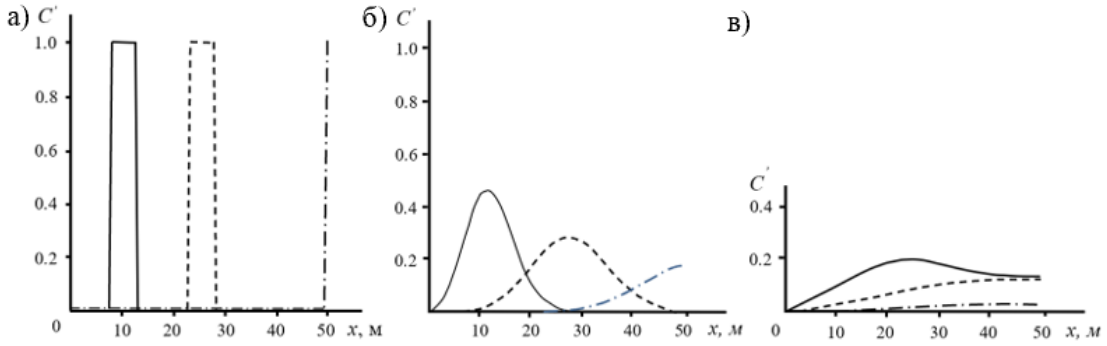

Рисунок 7 — Распределения безразмерной концентрации вредных примесей в ветви 3 в различные моменты времени: *а* — модель “идеального вытеснения”; *б* — постоянный коэффициент продольной дисперсии; *в* — переменный коэффициент продольной дисперсии

Разработанный алгоритм реализован в АК «АэроСеть» с целью выполнения расчета распространения газовых примесей на моделях вентиляционной сети рудников произвольной топологии.

Результаты моделирования распространения газовых примесей в вентиляционной сети с применением модели «идеального вытеснения» без учета диффузии (а) и с постоянным по длине эффективным коэффициентом продольной дисперсии (б) приведены на рисунке 8.

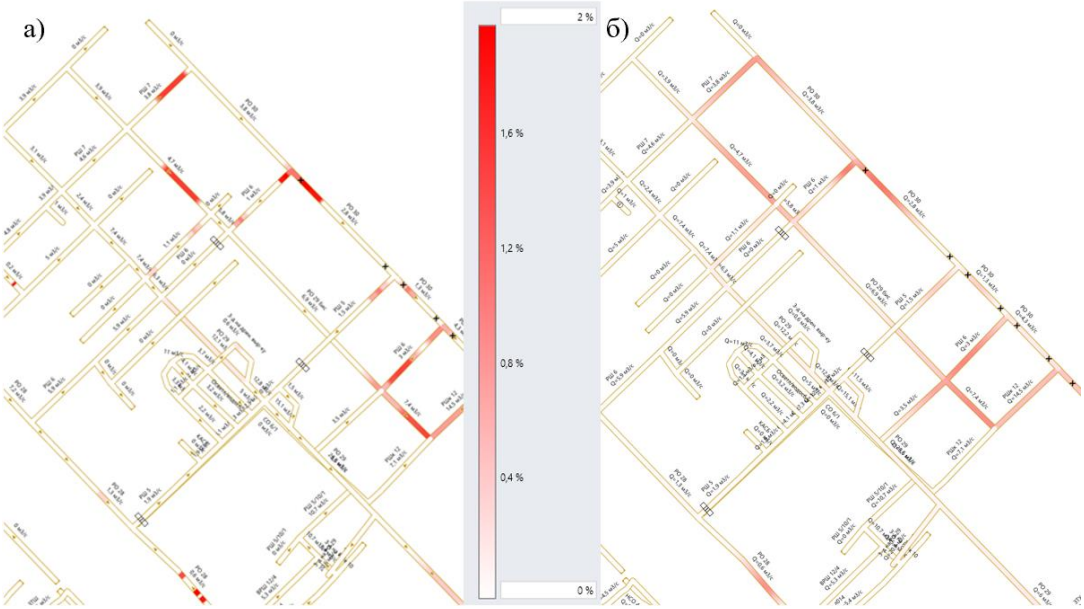

Рисунок 8 — Результат моделирования распространения газовых примесей в АК «АэроСеть» без учета (а) и с учетом (б) продольной диффузии через 60 минут после начала расчета

Согласно рисунку 8, введение диффузионного слагаемого с постоянным коэффициентом продольной дисперсии дает существенное изменение распределения концентрации, а также уменьшение максимальной концентрации вредной примеси в

ветвях к конечному времени расчета. В случае расчета с применением модели «идеального вытеснения» общее время проветривания составляет 5,5 часов, а концентрации газа варьируются в пределах от 1% до 5%, тогда как с постоянным по длине эффективным коэффициентом продольной дисперсии общее время проветривания составляет 2 часа, а концентрации газа варьируются в пределах от 0,3% до 1%.

Разработанная модель позволяет рассчитывать конвективно-диффузионный перенос вредных примесей в вентиляционных сетях произвольной топологии с учетом влияния скоростей потока в соседних горных выработках, конвективного и диффузионного процессов. Проведенные исследования позволили выбрать расчетные формулы для определения эффективного коэффициента продольной дисперсии, необходимые для программной реализации модели конвективно-диффузионного переноса вредных примесей в вентиляционных сетях для выработок с высокими и низкими скоростями движения воздуха.

III научное положение

3. Способы организации рециркуляционного проветривания, обоснованные натурными исследованиями и методами математического моделирования, включающие расчет параметров рециркуляции на основе аэродинамических и газодинамических характеристик вентиляционной сети, позволяют повысить безопасность и энергоэффективность вентиляции подземных рудников.

В работе разработаны схемы рециркуляции для нескольких типовых вариантов вскрытия месторождений, выполнены исследования аэродинамических параметров вентиляционных сетей и установлено, что эффективность работы рециркуляционных систем зависит от места их размещения и параметров рециркуляции (производительности и напора рециркуляционной установки).

Для анализа энергоэффективности рециркуляционного проветривания в зависимости от аэродинамических параметров рециркуляционного контура и параметров рециркуляции рассмотрим упрощенную модель проветривания с рециркуляционном контуром, представленную на рисунке 4. В качестве основных параметров модели выбраны количество воздуха, подаваемого без учета рециркуляции и утечек Q_0, коэффициенты утечек и рециркуляции в системе. С учетом выражений для определения расходов воздуха и сопротивлений ветвей можно записать уравнение для определения общего энергопотребления, которое будут затрачивать главная и рециркуляционная установки для поддержания заданного распределения расходов:

$$N = \left((1-L)\cdot R_0 + \frac{(L\cdot R_0 + R_{РЗ})}{(1-K_{рец})^3} \cdot \frac{R_{сб}\cdot K_{рец}^3}{(1-K_{рец})^3} \right) \cdot \left(\frac{(1-K_{рец}\cdot K_{ут})}{(1-K_{ут})} Q_0 \right)^3. \qquad (14)$$

Где L — доля сопротивления выработок главных направлений, входящая в рециркуляционный контур; Q_0 — расход воздуха, поступающего на проветривание рабочей зоны, м^3/с; $K_{ут}$ — коэффициент утечек; $K_{рец}$ — коэффициент рециркуляции; $R_{РЗ}$ — аэродинамическое сопротивление рабочей зоны, Н·с^2/м^8; $R_{сб}$ — аэродинамическое сопротивление рециркуляционной сбойки, Н·с^2/м^8; R_0 — полное аэродинамическое сопротивление главных направлений, Н·с^2/м^8.

Можно заметить, что первая скобка описывает эффективное сопротивление системы с учетом рециркуляционного контура, а вторая – эффективный расход свежего воздуха с учетом его снижения за счет рециркуляционного проветривания.

Для анализа полученной зависимости построим графики зависимости мощности вентиляторов от коэффициента рециркуляции для следующих параметров:

1) Суммарные утечки внутри участка составляют 25 %, рециркуляционная сбойка находится вне выработок главного направления (параметр L равен нулю). (Зависимость мощности вентиляторов от коэффициента рециркуляции при внутренних утечках 25 %).
2) Суммарные утечки внутри участка составляют 50 %, рециркуляционная сбойка находится вне выработок главного направления.
3) Суммарные утечки внутри участка составляют 25 %, часть сопротивления выработок главных направлений входит в рециркуляционный контур (параметр L равен 0,2).

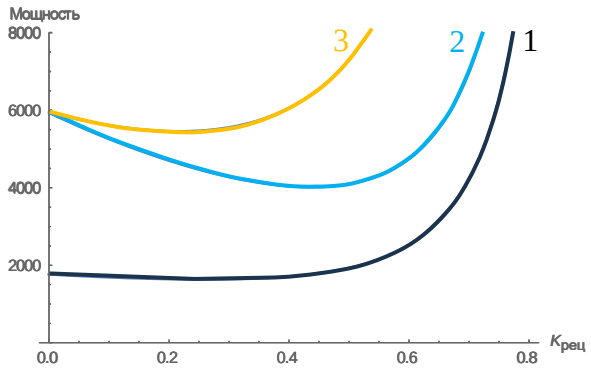

Рисунок 9 — Зависимость мощности вентиляторов от коэффициента рециркуляции при внутренних утечках 25 % и L=0 (1), 50 % и L=0 (2) и 25 % и L=0,2 (3) соответственно

Анализ полученных зависимостей показал, что суммарное энергопотребление при применении рециркуляции зависит от величины внутренних утечек воздуха внутри рециркуляционного контура и места размещения рециркуляционной установки (доли

сопротивления выработок главных направлений, входящих в рециркуляционный контур).

Схемы рециркуляционного проветривания разработаны для центральной и фланговой схем проветривания, а также для варианта, где сближенно расположенные стволы соединяются с добычными горизонтами квершлагами значительной протяженности с соблюдением необходимого условия наличия аэродинамической связи между воздухоподающими и вентиляционными выработками/горизонтами.

Рассмотрим случай организации рециркуляции для систем вентиляции рудных месторождений, которые характеризуются фланговой схемой проветривания и, как правило, имеют четкое деление на горизонты, свежая струя воздуха подается к местам ведения работ по откаточному горизонту и удаляется на вентиляционный или вентиляционно-закладочный, в зависимости от системы разработки. Организация рециркуляции, характерная для рудников с фланговой схемой проветривания, приведена на рисунке 8, при этом зачастую отсутствуют выработки, которые связывают свежую и исходящую струи, и требуется их проходка для последующего размещения рециркуляционных установок. Это отражает особенности аэродинамических схем рудников ПАО «ГМК «Норильский никель» (Скалистый, Таймырский, Комсомольский, Маяк и Октябрьский), а также рудника Заполярный ООО «Медвежий ручей», шахты Ангидрит и шахты Известняков.

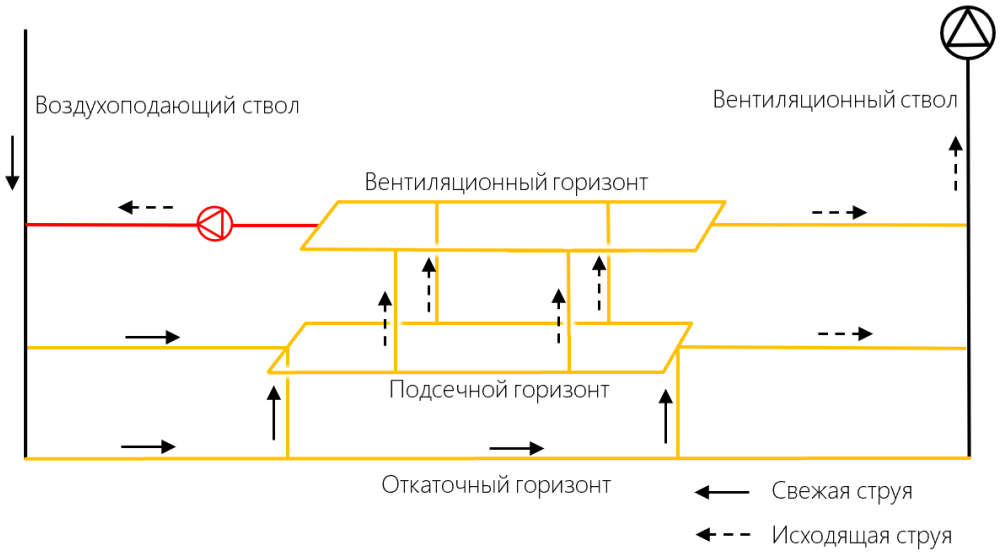

Рисунок 10 — Принципиальная схема организации рециркуляционного проветривания при фланговой схеме проветривания

Особенностью схем проветривания пластовых месторождений и рудников с центральной схемой проветривания является значительная протяженность выработок главных направлений, наличие большого количества аэродинамических связей между

воздухоподающими и вентиляционными штреками, представленных сбойками, вентиляционными скважинами, уклонами и другими выработками, в которых может быть размещена рециркуляционная установка. Это наблюдается в вентиляционных системах как при пластовом, так и при полевом способе подготовки, что характерно для калийных рудников.

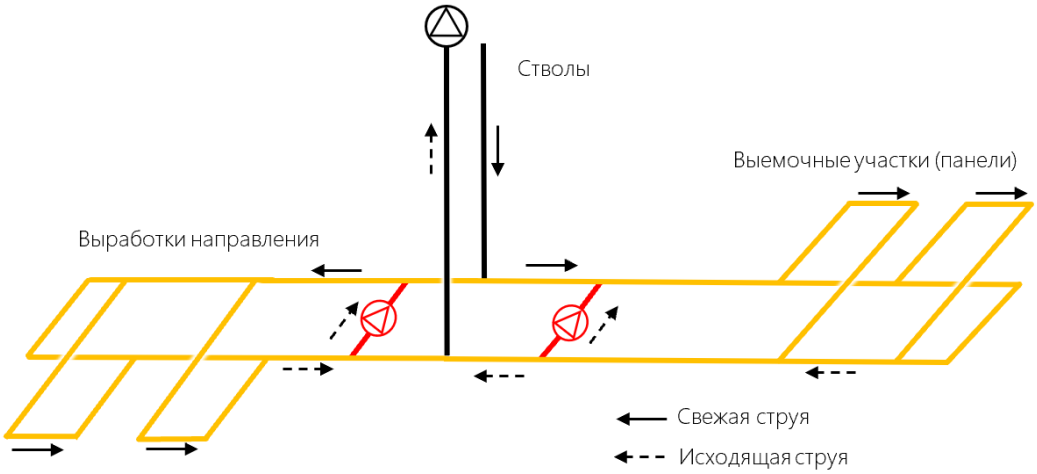

Рисунок 11 — Принципиальная схема организации рециркуляционного проветривания при центральной схеме проветривания

В качестве примера можно привести организацию рециркуляционного проветривания на руднике БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий». Установки оснащены датчиками расхода воздуха и датчиками концентрации газов, которые являются элементами системы рециркуляционного проветривания, детально места их размещения и внешний вид рециркуляционной установки показаны на рисунке 12, на примере северо-западного направления.

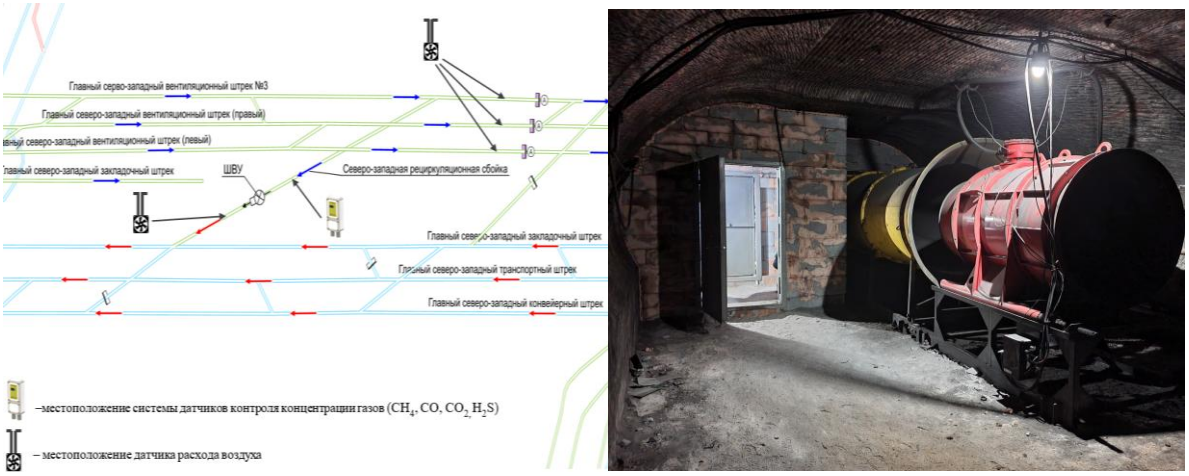

Рисунок 12 — Размещение элементов системы и рециркуляционная система на северо-западном направлении рудника БКПРУ-4

Применение рециркуляционного проветривания позволило добиться значительного снижения энергозатрат на проветривание и воздухоподготовку. Суммарные годовые затраты электрической энергии (кВтч) главной вентиляторной

установкой в зависимости от ее производительности и системой воздухоподготовки с учетом длительности отопительного периода определяются следующим выражением:

$$\Delta A = \frac{8760 \cdot 9{,}81 \cdot R \cdot (Q_1^3 - Q_2^3)}{1000 \cdot \eta} + \frac{N_{\text{от}} \cdot (G_1 - G_2) \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{кан}} - t_{\text{н}})}{1000}, \quad (15)$$

где R — аэродинамическое сопротивление рудничной вентиляционной сети, на которую работает вентилятор, кмюрг; Q — производительность ГВУ, м^3/с; η — КПД вентиляторной установки; $N_{\text{от}}$ — количество дней отопительного периода; $c_{\text{в}}$ — удельная теплоемкость воздуха, $1004\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$; G — массовый расход воздуха, кг/с; $t_{\text{н}}$ — расчётная температура наружного воздуха, °C; $t_{\text{кан}}$ — требуемая температура воздуха, поступающего в рудник, $+2$ °C.

Снижение энергозатрат на проветривание и воздухоподготовку составляет 218518820 кВтч.

При применении рециркуляции возникают риски превышения концентрации газа выше допустимых значений и прекращения поступления свежего воздуха или опрокидывания воздушной струи по причине влияния рециркуляционной установки на проветривание участка, что может привести к аварийным ситуациям. Для минимизации рисков возникновения угрозы безопасности к рециркуляционным установкам и системе проветривания в целом предъявляется ряд обязательных требований:

1. Реализация системы аэрогазового контроля, в том числе измерение концентраций горючих и ядовитых газов, а также кислорода O_2 в горных выработках, по которым осуществляется движение исходящей струи воздуха, с участка шахтного поля, на котором имеется вентиляционный контур с частичным повторным использованием воздуха.
2. Обеспечение перекрытия рециркуляционной сбойки при задействовании реверсивного режима.
3. Организация возможности дистанционного управления элементами системы рециркуляции и обеспечение вывода показаний диспетчеру рудника.
4. Оснащение главных вентиляторных установок частотным преобразователем тока для возможности плавного регулирования производительности агрегата.
5. Разработка и реализация алгоритма системы автоматической взаимосвязанной работы шахтных вентиляторных установок, автоматических регуляторов воздухораспределения, системы аэрогазового контроля и главной вентиляторной установки.

Результат проведенных исследований учитывается при разработке универсальной методики определения параметров рециркуляционного проветривания, применимой для рудников любого типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором исследований разработана система рециркуляционного проветривания подземных рудников. Совокупность результатов диссертационной работы можно квалифицировать как решение научной проблемы по повышению эффективности и обеспечению безопасных условий проветривания рудников за счет внедрения систем частичного повторного использования воздуха.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Исследованы схемы проветривания рудников различных типов и разработаны способы организации рециркуляционного проветривания для каждой группы рудников с учетом топологических особенностей сети горных выработок.
2. Проведены экспериментальные исследования аэродинамических параметров вентиляционных сетей и газового состава рудничного воздуха на рудниках ПАО «Уралкалий», ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» и ООО «Медвежий ручей», позволяющие сделать вывод о пригодности воздуха исходящей струи для его повторного использования на рудниках любого типа.
3. На основании натурных исследований внутренних утечек воздуха и аэродинамических параметров систем вентиляции шахт и рудников разработана методика расчета требуемого количества воздуха с учетом применения рециркуляции, учитывающая факторы проветривания рабочих зон, величину утечек воздуха внутри рециркуляционного контура и концентрацию газа на свежей струе, возникающую при наличии рециркуляционных контуров.
4. Разработана конвективно-диффузионная модель расчета газораспределения в сети горных выработок, учитывающая продольную дисперсию и позволяющая выполнять расчет газораспределения в выработках с малыми скоростями движения воздуха, учитывать конфигурацию выработок и соотношение скоростей движения воздуха в смежных выработках.

5. Разработаны мероприятия и технические требования к рециркуляционным установкам, позволяющие обеспечивать безопасность проветривания.
6. Разработана методика выбора оптимальных параметров рециркуляционных систем в зависимости от аэродинамических параметров вентиляционной сети по критерию минимальной потребляемой мощности и методика определения мест размещения рециркуляционных установок, учитывающая сопротивления выработок по маршруту движения воздуха.
7. Разработана универсальная схема расчета рециркуляционных систем, определяющая основные этапы разработки и внедрения рециркуляционных систем, применимая на рудниках любого типа.

СПИСОК РАБОТ,
опубликованных автором по теме диссертации

публикации в изданиях, утвержденные Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации

1. Казаков Б. П., Шалимов А. В., Трушкова Н. А. К оценке аварийных ситуаций при проектировании рециркуляционных систем // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — №. 1. — С. 132—137.
2. Зайцев А. В., Клюкин Ю. А., Трушкова Н. А. Аналитическое решение задачи расчета распределения температуры воздуха в горных выработках при наличии рециркуляционных потоков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — №. 9. — С. 190—194.
3. Гришин Е. Л., Накаряков Е.В., Трушкова Н.А., Саникович А.Н. Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников // Горный журнал. — 2018. — №. 8. — С. 103—108.
4. Kazakov B., Trushkova N., Shalimov A., Grishin E. On the possibility of using controlled air recirculation in potash and metal mines //International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. — 2020. — vol. 20. — №. 1.2. — pp. 203—210.
5. Казаков Б. П., Гришин Е. Л., Трушкова Н. А. Исследование устойчивости совместной работы подземных вентиляторов в калийном руднике при применении рециркуляции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2021. — №. 2. — С. 108—119.
6. Зайцев А. В., Трушкова Н. А. Исследование рециркуляционного проветривания при наличии источника газовыделения в рабочей зоне и внутренних утечек воздуха // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — №. 3. — С. 34—46.
7. Семин М. А., Исаевич А.Г., Трушкова Н.А., Бублик С.А., Казаков Б.П. К вопросу о расчете распространения вредных примесей в системах горных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — №. 2. — С. 82—93.
8. Трушкова Н.А., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Учет аэродинамических характеристик вентиляционной сети при определении параметров рециркуляционного проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2024. — №. 9. — С. 5—16.
9. Файнбург Г.З., Трушкова Н.А., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Основные требования к организации рециркуляционного проветривания в многосвязных системах

подземных горных выработок // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2024. — №. 3. — С. 458—480.

публикации в других изданиях

10. Левин Л.Ю., Трушкова Н.А. Исследование распространения газовых примесей с учетом рециркуляционного проветривания. Проблемы геологии и освоения недр. Труды международного симпозиума студентов и молодых ученых. Томск 2009.
11. Казаков Б.П., Трушкова Н.А., Зайцев А.В. Применение частичного повторного использования воздуха для снижения количества выпадающей влаги в калийных рудниках // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. — 2012. — №. 3. — С. 129—133.
12. Трушкова Н.А., Казаков Б.П., Зайцев А.В., Гришин Е.Л. Повышение эффективности проветривания рудников при применении частичного повторного использования воздуха. Сборник трудов всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена 2015».
13. Трушкова Н.А. Обеспечение безопасных условий эксплуатации рудников при применении частичного повторного использования воздуха // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2015. — С. 285—288.
14. Трушкова Н.А., Казаков Б.П., Зайцев А.В., Гришин Е.Л. Применение рециркуляционных установок для повышения эффективности проветривания рудников с учетом обеспечения безопасных условий труда // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. — 2015. — Т. 1. — С. 283—290.
15. Трушкова Н.А. Реализация системы автоматического управления проветриванием на руднике БКПРУ-4 ПАО" Уралкалий" // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2017. — С. 324—328.
16. Трушкова Н.А. Исследование газового состава рудничного воздуха для оценки возможности применения рециркуляционного проветривания // Горное эхо. — 2019. — №. 3. — С. 84—87.
17. Трушкова Н.А. Исследование аэродинамических параметров рудничных вентиляционных сетей для определения параметров рециркуляционного проветривания // Горное эхо. — 2020. — №. 4. — С. 102—106.

18. Трушкова Н.А., Бублик С.А. Расчет распространения газовых примесей в горных выработках на основе модели конвективно-диффузионного переноса // Горное эхо. — 2021. — №. 3. — С. 110—117.
19. Зайцев А.В., Трушкова Н.А. Исследование параметров рециркуляционного проветривания рабочих зон с учетом различных факторов расчета количества воздуха // Горное эхо. — 2023. — №. 2. — С. 82—89.
20. Левин Л.Ю., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А., Накаряков Е.В. Частичное повторное использование воздуха в системах вентиляции горнодобывающих предприятий // Вестник государственной экспертизы. — 2024. — №. 2. — С. 68—75.
21. Трушкова Н.А., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Особенности применения рециркуляционных установок для проветривания рудников в современных условиях с учетом изменений нормативной базы // Горное эхо. — 2024. — №. 3. — С. 91—96.

Сдано в печать «____» _____ 2025 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а