

На правах рукописи



Зайцев Артём Вячеславович

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ
ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ**

Специальность 25.00.20

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Пермь 2019

Диссертация подготовлена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Пермском федеральном исследовательском центре Уральского отделения Российской академии наук и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный консультант: **Козаков Борис Петрович**
профессор, доктор технических наук,
главный научный сотрудник отдела аэрологии и тепло-
физики «ГИ УрО РАН» (г. Пермь)

Официальные оппоненты: **Гендлер Семен Григорьевич**
профессор, доктор технических наук,
профессор кафедры безопасности производств
Горный университет (г. Санкт-Петербург),

Курилко Александр Сардокович
доктор технических наук,
заведующий лабораторией горной теплофизики
ИГДС СО РАН (г. Якутск)

Палеев Дмитрий Юрьевич
доктор технических наук,
начальник научно-исследовательского отдела
ФГКУ «Национальный горноспасательный центр» (г.
Новокузнецк)

Ведущая организация: **ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»**

Защита диссертации состоится «.....» 2019 года в-..... часов
на заседании диссертационного совета Д 004.036.02 при ГИ УрО РАН по адресу:
г. Пермь, ул. Сибирская, 78а. С диссертационной работой можно ознакомиться в библиоте-
теке и на сайте «ГИ УрО РАН»: <http://www.mi-perm.ru>

Автореферат разослан «.....» 2019 года.

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направить в двух экземплярах
не позднее, чем за 15 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фа-
милия, 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: bba@mi-perm.ru

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. геол.-минерал. наук., доцент



Б.А. Бачурин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

На современном этапе развития многие горные предприятия для поддержания и увеличения мощности добычи сталкиваются с необходимостью вовлечения в отработку новых, глубокозалегающих и труднодоступных залежей. При увеличении глубины ведения горных работ возрастает температура окружающего породного массива и снижается количество вскрывающих горных выработок, что приводит к невозможности подачи больших объемов воздуха и усилению влияния техногенных источников тепловыделения на формирование неблагоприятных микроклиматических условий в горных выработках. В результате температура воздуха в горных выработках повышается до сверхнормативных величин — согласно действующим Федеральным нормам и правилам «Правила безопасности при ведении горных работ ...», температура воздуха не должна превышать +26 °С. Высокая температура воздуха отрицательно влияет на здоровье горнорабочих и затрудняет ведение горных работ из-за перегрева оборудования.

Подземная разработка глубокозалегающих залежей полезных ископаемых показала необходимость решения задач нормализации теплового режима — имеются опытные данные по шахтам и рудникам СССР (шахты Донецкого угольного бассейна, рудники Норильска, Кривого Рога), а также стран дальнего зарубежья (рудники ЮАР, Канады, Бразилии, Индии). Исследованием процессов формирования теплового режима и разработкой способов его регулирования на территории нашей страны занимались О.А. Кремнев, А.Н. Шербань, А.Ф. Воропаев, Ю.Д. Дядькин, С.Г. Гендлер, Ю.В. Шувалов, Г.Г. Андреев, Б.И. Медведев, Г.В. Дуганов, Ю.А. Цейтлин, В.Л. Черняк, В.Я. Журавленко, Ш.И. Ониани, В.Г. Терещенко, В.Г. Шточес и другие. Среди зарубежных исследователей широко известны работы исследователей M.J. McPherson, K.L. Gibson, S.J. Bluhm, L. Маскау. Но ограниченные возможности вычислительной техники привели к развитию приближенных методов расчета теплового режима, имеющих узкую область применимости. Выбор способов и средств регулирования теплового режима чаще всего сводился к использованию балансовых энергетических соотношений без учета их взаимовлияния и расчета их энергоэффективности.

Практический опыт регулирования теплового режима показал, что реализация любых мероприятий по нормализации микроклиматических условий в горных выработках связана со значительными капитальными и эксплуатационными затратами. В современных рыночных условиях дополнительные расходы, связанные с внедрением систем

нормализации микроклиматических условий, приводят не только к снижению конкурентоспособности предприятия, но и зачастую делают нецелесообразной отработку новых глубокозалегающих запасов полезных ископаемых. Таким образом, современные условия накладывают дополнительные требования к технико-экономическому обоснованию разрабатываемых технических решений. Эти решения, с одной стороны, должны обеспечивать безопасные условия труда, а с другой — отличаться минимальными капитальными и эксплуатационными затратами.

На сегодняшний день такие крупнейшие горнодобывающие предприятия, как ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», ОАО «Беларуськалий», АК «МХК «ЕвроХим», ООО «УГМК-Холдинг», АО «СУБР», вовлекают в отработку глубокие залежи полезных ископаемых (до 2 километров) с высокой температурой окружающего массива горных пород (до +50 °С). Для возможности ведения горных работ на такой глубине в безопасных условиях труда и с высокими технико-экономическими показателями работа, ориентированная на обоснование и разработку ресурсосберегающих систем управления теплого режима глубоких рудников, является актуальной.

Цель работы

Разработка теоретических и технологических основ построения ресурсосберегающих систем управления термодинамическими параметрами рудничной атмосферы, обеспечивающих безопасные условия труда в подземных рабочих зонах при ведении горных работ в условиях влияния мощных техногенных источников тепловыделения и высокой температуры породного массива.

Основная идея работы

Совершенствование и разработка способов регулирования теплового режима, их оптимальное комплексирование по критерию минимальных энергетических затрат с учетом горнотехнических особенностей глубоких рудников на основе многовариантного численного моделирования термодинамических процессов в системе «рудничный воздух – массив горных пород».

Основные задачи работы:

1. Выполнить экспериментальные исследования формирования микроклиматических параметров воздуха в подземных рабочих зонах глубоких рудников различных типов.

2. Исследовать тип, мощность и характер тепловыделения техногенных источников в горных выработках глубоких рудников.
3. Разработать математическую модель расчета тепло-, влаго- и воздухораспределения в сети горных выработках с учетом специфических особенностей формирования теплового режима глубоких рудников.
4. Разработать ресурсосберегающие технические решения по нормализации микроклиматических условий в главных воздухоподающих выработках и выработках околоствольных дворов.
5. Исследовать эффективность рециркуляционного проветривания для управления микроклиматическими параметрами воздуха.
6. Разработать математическую модель расчета теплообменных процессов в теплообменных аппаратах систем кондиционирования рудничного воздуха, учитывающую различные варианты движения хладоносителя и воздуха.
7. Разработать ресурсосберегающие схемы кондиционирования воздуха на участках ведения горных работ для очистных и проходческих забоев.
8. Обосновать систему нормирования микроклиматических условий и режимов работы горнорабочих, обеспечивающих безопасные условия труда по тепловому фактору.
9. Разработать теоретические и технологические основы построения ресурсосберегающих систем управления тепловым режимом глубоких рудников с учетом их индивидуальных особенностей по критерию минимальных затрат ресурсов.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования воздухораспределения и термодинамических процессов в шахтных и лабораторных условиях, статистическую обработку результатов экспериментов, математическое моделирование воздухо- и теплораспределения, анализ результатов численных экспериментов, натурные исследования способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках действующих шахт и рудников.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Синтезированная теплофизическая модель системы горных выработок и окружающего массива горных пород, включающая модели тепловыделений от техногенных источников и модель конвективного теплопереноса в сети горных выработок с учетом нестационарного сопряженного теплообмена воздуха с породным массивом и процессов влагообмена в рудничной атмосфере, позволяющая

рассчитывать микроклиматические параметры воздуха в горных выработках подземных рудников.

2. Определение оптимальных параметров главных воздухоподающих выработок по критерию минимальных энергетических затрат и применение рециркуляционного проветривания с использованием тепловой ёмкости породного массива позволяют обеспечить стабилизацию и улучшение микроклиматических условий в подготовительных и очистных горных выработках в переходном интервале глубин.
3. Математическая модель расчета рекуперативных теплообменных аппаратов, учитывающая перекрестную, однонаправленную и противоположно направленную схемы движения теплоносителя и воздушной среды и фазовые переходы влаги, позволяет подбирать оптимальные компоновки и схемы обвязки шахтных теплообменных аппаратов по критерию максимальной удельной теплопередачи.
4. Технологические схемы нормализации микроклиматических условий в очистных и проходческих горных выработках, заключающиеся в отведении избыточных тепловыделений непосредственно на участках их формирования и локального кондиционирования воздуха в пределах рабочих зон, позволяют обеспечивать требуемые температуры воздуха при минимальной располагаемой холодильной мощности.
5. Ресурсосберегающие системы регулирования теплового режима глубоких рудников разрабатываются на основе решения задачи оптимизации выбора мест и параметров охлаждения воздуха и отведения избыточной теплоты по критерию минимального энергопотребления с применением комплексного параметра нормирования микроклиматических условий, учитывающего совместное влияние температуры, влагосодержания и скорости движения воздуха на охлаждающую способность рудничной атмосферы.

Научная новизна:

1. Разработаны феноменологические модели техногенных источников тепловыделения и параметрическое обеспечение для современных горных машин, применяемых в глубоких шахтах и рудниках.
2. Обоснованы технические решения по эффективному использованию поверхностных систем кондиционирования воздуха с учетом глубины стволов, температуры окружающего породного массива и сезонных колебаний атмосферного воздуха.

3. Исследовано влияние сезонных колебаний атмосферного воздуха на эффективность применения теплоизоляции горных выработок с учетом естественной температуры массива горных пород.
4. Разработан способ улучшения микроклиматических параметров воздуха в горных выработках на основе организации рециркуляционного проветривания участка и теплового взаимодействия между рудничным воздухом, массивом горных пород и источниками тепловыделения.
5. Решена задача оптимизации мест установки и параметров воздухоохладителей в сети подготовительных и очистных горных выработок по критерию минимизации потребляемой холодильной мощности.
6. Разработана модель теплообмена между воздушным потоком и элементом рекуперативных теплообменных аппаратов, учитывающая пространственное распределение термодинамических параметров сред, участвующих в теплообмене и тепловыделения от фазовых переходов влаги.
7. Разработана методика выбора оптимального сочетания горнотехнических и теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима в зависимости от температуры окружающего породного массива, типа горных выработок и их удаленности от поверхности земли по тракту движения воздуха.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натурных экспериментов, соответствием приведенных результатов данным, полученным другими авторами, значительным объемом наблюдений, выполненных в натуральных условиях при проведении промышленных испытаний, положительными результатами реализации предложенных технических решений на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» и ОАО «Беларуськалий».

Практическое значение и реализация результатов работы

Результаты, полученные в работе, позволяют использовать новую методологию при разработке и проектировании систем управления тепловым режимом, применение которой приводит к обеспечению безопасных условий труда по тепловому фактору в горных выработках глубоких рудников при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.

В настоящее время многие результаты работы внедрены в промышленную эксплуатацию на горнодобывающих предприятиях, часть находится в процессе внедрения.

Разработанная подземная система кондиционирования воздуха КШР-350Н, предназначенная для местного кондиционирования воздуха, в настоящее время находится в промышленной эксплуатации в руднике «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» при отработке запасов на глубине свыше 1300 метров.

Разработанный горнотехнический способ нормализации микроклиматических условий в горных выработках на основе рециркуляционного проветривания применяется на рудниках ОАО «Беларуськалий» для снижения температуры воздуха и стабилизации температурно-влажностных параметров в капитальных, подготовительных и очистных выработках. Для нормализации микроклиматических условий в длинных очистных забоях при отработке наиболее глубокозалегающих запасов Старобинского месторождения разработана система кондиционирования воздуха СКВ-250 с отведением избыточных тепловыделений в исходящую вентиляционную струю, в настоящее время установка прошла опытно-промышленные испытания и находится в промышленной эксплуатации в руднике 4 РУ ОАО «Беларуськалий».

На основании результатов исследований разработаны комплексные системы управления тепловым режимом шахт «Глубокая» и рудника «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» в качестве исходных данных для проектной документации на отработку глубоких залежей С-2, С-5, С-5л, С-6 и С-6л, С-3 и С-4 Октябрьского месторождения сульфидных медно-никелевых руд (глубина ведения горных работ до 2000 метров); разработаны технические решения по обеспечению требуемых микроклиматических параметров в горных выработках для проектов строительства глубоких калийных рудников Петриковского ГОК ОАО «Беларуськалий» и Гремячинского ГОК ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий» (глубина ведения горных работ до 1200 метров). Разработанные технические решения включены в проектную документацию.

Разработанная система нормирования микроклиматических условий в горных выработках с организационными мероприятиями по безопасному ведению горных работ в условиях теплового режима вошла в состав действующих методик по расчету количества воздуха и организации проветривания горнодобывающих предприятий ОАО «Беларуськалий», ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий».

На основании результатов исследований разработан программный модуль «Теплофизика», интегрированный в аналитический комплекс «АэроСеть», предназначенный для прогнозирования теплового режима глубоких рудников и имитационного моделирования работы шахтных систем кондиционирования воздуха. Аналитический комплекс «АэроСеть» используется в проектных институтах ОАО «Институт «Уралгипроруда»,

ОАО «Галургия», ООО «Институт «Гипроникель», ООО «ТОМС-Проект», ООО «СПБ-Гипрошахт», ООО «Забайкалзолотопроект».

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертационная работа выполнена в соответствии с государственными планами научных исследований ГИ УрО РАН, проводившихся в период 2008-2019 гг., по темам «Проблемы энергосбережения при нормализации состава и теплофизических параметров атмосферы подземных пространств» (№ 01.200.106715) и «Моделирование и управление параметрами аэротермодинамических процессов при освоении месторождений минерального сырья» (№ 01.201.350099), а также с тематикой хозяйственных работ с горными предприятиями ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», ОАО «Беларуськалий», АК «МХК «ЕвроХим» и проектными институтами ООО «Институт Гипроникель», АО «Галургия».

С 2012 г. по 2016 г. исследования по теме диссертации были поддержаны и частично финансировались Президиумом УрО РАН (проект ориентированных фундаментальных исследований № 12-5-1-014-АРКТИКА «Разработка комплексной ресурсосберегающей системы нормализации микроклиматических параметров атмосферы шахт и рудников в условиях криолитозоны», проект № 12-С-5-1019 «Разработка математических методов моделирования нестационарных аэрологических и теплогазодинамических процессов, протекающих в рудничных вентиляционных сетях в условиях вечной мерзлоты»), Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 13-05-96013 «Разработка комплексной технологии повышения энергоэффективности, обеспечения ресурсосбережения и промышленной безопасности в горнодобывающей промышленности» и проект № 15-05-04552 «Исследование влияния фазовых переходов атмосферной влаги на формирование комфортных условий ведения горных работ») и Советом по грантам Президента Российской Федерации (проект № МД-7047.2015.5 «Разработка инновационной ресурсосберегающей системы мониторинга и управления вентиляцией горных предприятий, обеспечивающей безопасную и высокопроизводительную добычу полезных ископаемых в сложных горнотехнических условиях»).

Апробация работы

Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях ГИ УрО РАН (Пермь, 2011-2018 гг.), на международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2012-2015, 2019 гг.), на международной научно-практической конференции «Аэрология и безопасность

горных предприятий» (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2012 г.), на II и III Всероссийской научно-практической конференции «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (г. Якутск, ИГДС СО РАН, 2013, 2015 и 2017 гг.), на II и III международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятия минерально-сырьевого комплекса в XXI веке (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2014 и 2016 гг.), на Всероссийском молодежном форуме «Нефтегазовое и горное дело» (Пермь, ПНИПУ, 2011 и 2012 гг.), на Всероссийской научно-практической конференции «Развитие Арктики и приполярных регионов» (г. Екатеринбург, УрФУ имени Б.Н. Ельцина, 2014 г.), на V Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий» (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2014), на 42-ой международной летней школе «Advanced Problems in Mechanics 2014» (г. Санкт-Петербург, СГПУ, 2014 г.), на I Международной научно-практической конференции «Горная электромеханика — 2014» (г. Пермь, ПНИПУ, 2014 г.), на II Международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика — 2015» (г. Пермь, ПНИПУ, 2015 г.), на IX Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2015 г.), на Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена — 2015» (г. Новосибирск, ИГД СО РАН, 2015 г.), на Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию горного факультета «Горное дело в XXI-веке: технологии, наука, образование» (г. Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2015 г.), на научно-технических советах рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», института ООО «Гипроникель», проектного института АО «Галургия», руднике Гремячинского ГОК и управлении ООО «ЕвроХим», рудниках и управлении ОАО «Беларуськалий» в 2011-2018 годах.

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.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 43 научные работы, в том числе 22 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.

Получены 3 патента на изобретения и 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав и заключения. Работа изложена на 247 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 51 таблицу. Список использованных источников состоит из 231 наименования, в том числе 43 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I научное положение

Синтезированная теплофизическая модель системы горных выработок и окружающего массива горных пород, включающая модели тепловыделений от техногенных источников и модель конвективного теплопереноса в сети горных выработок с учетом нестационарного сопряженного теплообмена воздуха с породным массивом и процессов влагообмена в рудничной атмосфере, позволяющая рассчитывать микроклиматические параметры воздуха в горных выработках подземных рудников.

Исследование способов регулирования теплового режима требует математического моделирования процессов формирования микроклиматических параметров воздуха в горных выработках глубоких рудников. Для определения факторов, влияющих на тепловой режим горных выработок, и их учета при разработке математических моделей, а также параметрического обеспечения дальнейших расчетов, выполнены обширные экспериментальные исследования процессов формирования теплового режима в глубоких рудниках. Экспериментальные исследования выполнены на глубоких медно-никелевых рудниках Талнахского и Октябрьского месторождений в Норильском промышленном районе (глубина ведения горных работ до 2100 метров) и калийных рудниках Старобинского месторождения в Республике Беларусь (глубина ведения горных работ до 900 метров).

Выполненные измерения позволили установить общую закономерность формирования теплового режима глубоких рудников различного типа, общий вид которой представлен на рисунке 1.

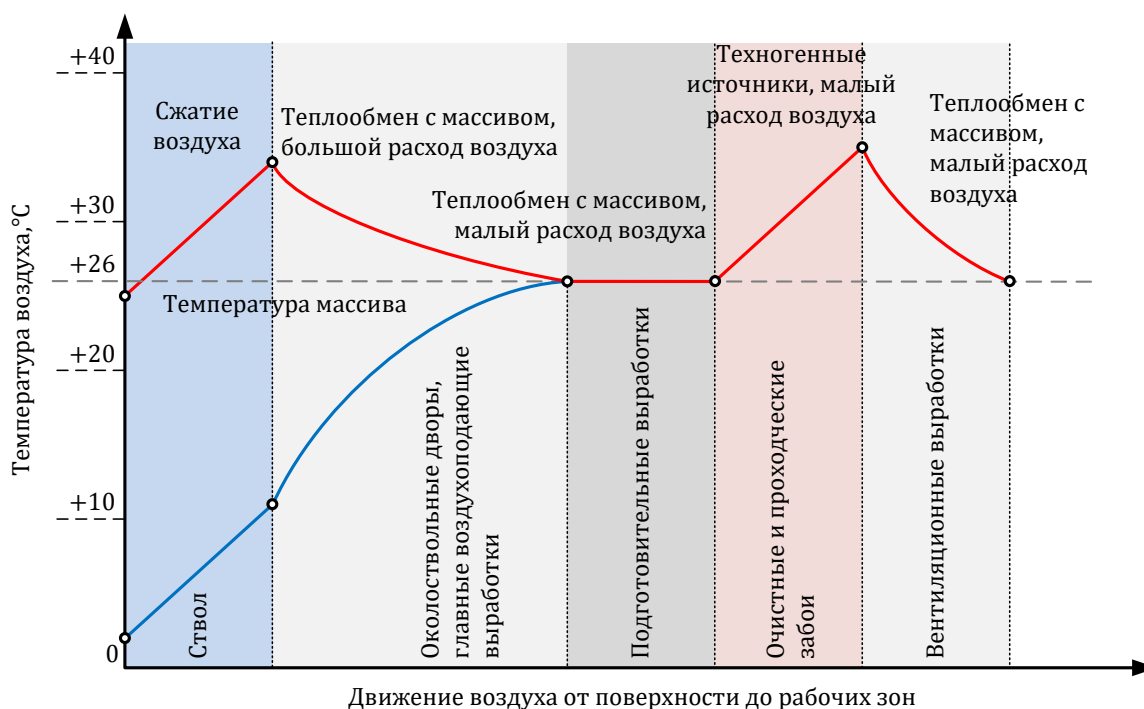


Рисунок 1 — Закономерность формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников

Как видно из приведенного на рисунке 1 графика начальные параметры воздуха, подаваемого на проветривание, определяются климатическими условиями на поверхности и зависят от региона, времени года и суток. При наличии системы воздухоподготовки на поверхности параметры воздуха претерпевают изменения и именно они определяют параметры воздуха на начальном участке ствола вблизи устья. В дальнейшем при опускании воздуха по стволу происходит его заметный нагрев из-за гидростатического сжатия с градиентом $0,00667 \dots 0,00769$ °C/м, который варьируется в зависимости от интенсивности фазовых переходов влаги, что может приводить даже к снижению градиента до $0,00455$ °C/м. При дальнейшем движении по главным воздухоподающим выработкам воздух в процессе теплообмена с окружающими горными породами принимает естественную температуру массива горных пород, зависящую от геотермии участка. Непосредственно в рабочих зонах количество подаваемого воздуха снижается из-за его распределения по большому количеству горных выработок, а интенсивность тепловыделения от техногенных источников растёт — именно в местах ведения горных работ сосредоточено наибольшее количество горных машин и механизмов. В силу этого наиболее

неблагоприятные микроклиматические условия формируются непосредственно в подготовительных и очистных горных выработках, в которых и были проведены детальные экспериментальные исследования формируемых вентиляционного и теплового режимов, а также выполнены измерения параметров тепловыделения от техногенных источников. На рисунке 2 представлены термограммы, иллюстрирующие интенсивный нагрев воздуха в подготовительных и очистных выработках.

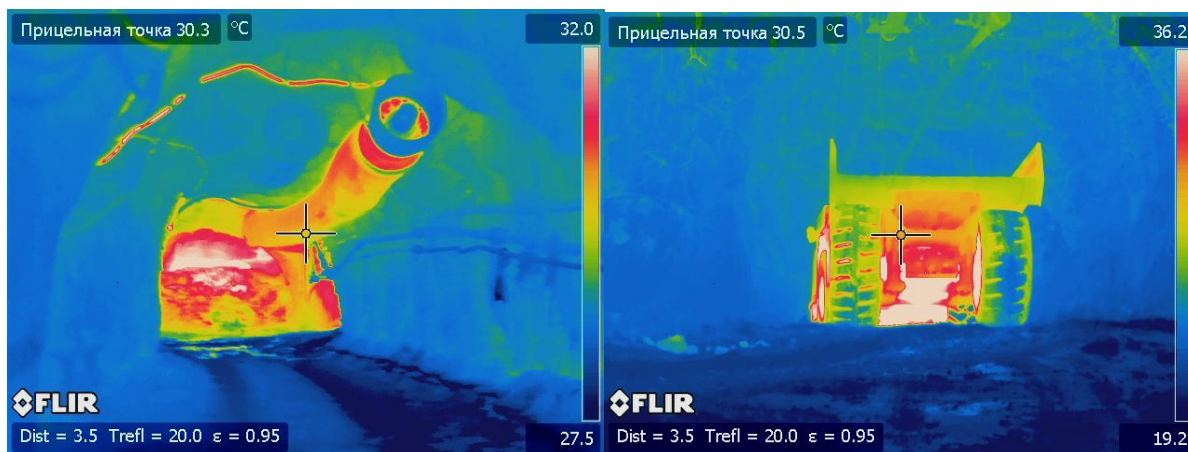


Рисунок 2 — Термограммы в очистных и подготовительных выработках

При дальнейшем движении воздуха по вентиляционным выработкам его температура вновь снижается и приближается к температуре окружающего породного массива.

По результатам экспериментальных исследований установлены следующие факторы формирования теплового режима, учет которых необходим при математическом моделировании процессов формирования теплового режима глубоких рудников:

- гидростатическое сжатие/разрежение воздуха при движении по вертикальным и наклонным горным выработкам;
- теплообмен воздуха с окружающим массивом горных пород;
- тепловыделения от фазовых переходов влаги;
- тепловыделения от техногенных источников тепловыделения (горные машины с двигателями внутреннего сгорания, электрическими приводами и твердеющие закладочные массивы).

С учетом этих факторов разработана численная математическая модель расчета распределения температуры и влажности воздуха в сети горных выработок произвольной топологии. Расчет производится на основе модели идеального вытеснения с учетом известного воздухораспределения в вентиляционной сети. В рамках модели идеального вытеснения каждая j -ая ветвь дискретизируется на расчетные ячейки ΔL_j , длина которых определяется

$$\Delta L_j = v_j \cdot \Delta t, \quad (1.1)$$

где v_j — скорость движения воздуха в ветви, м/с; Δt — заданный для моделирования шаг по времени, с.

Расчет распределения температуры в выработках осуществляется по выражению

$$T_{ij}^{t+1} = T_{i-1j}^t + \frac{W_{ij}^t \cdot \Delta t}{c_a \cdot \rho_{ij} \cdot S_j \cdot \Delta x_{ij}} + \frac{\alpha_j \cdot (T_{i,j}^t - \tau_{0,i,j}^t) \cdot F_{ij} \cdot \Delta t}{c_a \cdot \rho_{ij} \cdot S_j} + \frac{g \cdot \Delta x_{ij} \cdot \sin \alpha_j}{\left(c_a + \frac{R}{M}\right)}, \quad (1.2)$$

где T_{ij}^{t+1} — температура воздуха в i -ой ячейке j -ой ветви в рассчитываемый момент времени, °С; W_{ij}^t — количество теплоты, выделяющееся от техногенных источников в i -ой ячейке j -ой ветви в момент времени t , Вт; c_a — теплоёмкость воздуха, Дж/кг·°С; α_j — коэффициент теплоотдачи на границе «воздух — массив», Вт/м²; $\tau_{0,i,j}^t$ — температура массива горных пород на границе «воздух — массив» на участке i -ой ячейки j -ой ветви, °С; F_{ij} — площадь контакта i -ой ячейки j -ой ветви с массивом горных пород, м². В правой части выражения (1.2) первое слагаемое учитывает трансляционный перенос параметров воздуха из одной расчетной ячейки в другую, второе слагаемое учитывает влияние техногенных источников тепловыделения, третье — влияние теплообмена воздуха с окружающим породным массивом, а четвертое — гидростатический нагрев/охлаждение воздуха при его движении по вертикальным или наклонным горным выработкам.

Для расчета влияния техногенных источников тепловыделения на температуру воздуха в выработке на основе обширных экспериментальных исследований разработаны феноменологические модели техногенных источников тепловыделения горных машин с двигателями внутреннего сгорания, комбайнов и конвейерных линий с электрическими приводами. Феноменологические модели связывают номинальные мощности двигателей машин с эффективным тепловыделением от них в рудничную атмосферу. В таблице 1 представлены полученные расчетные формулы и диапазоны измеренных коэффициентов интенсивности тепловыделения.

Таблица 1 — Установленные зависимости мощности тепловыделения от типа машин

Тип машины	Мощность тепловыделения	Коэффициент интенсивности K

Самоходная с двигателем внутреннего сгорания	$W_{\text{двс}} = K_{\text{двс}} \cdot \frac{P_p \cdot C_T \cdot 1000}{3600}$	0,16...0,33
Узкозахватный комбайн с электродвигателем	$W_{\text{привода}} = K_{\text{эл}} \cdot \frac{(100 - \eta)}{\eta} \cdot N_{\text{эл}}$	0,08...0,11
Конвейерная линия	$W_{\text{ленты}} = K_{\text{эл}} \cdot \frac{\eta}{100} \cdot \frac{N_{\text{эл}}}{L}$	0,05...0,08

В выражении (1.2) температура массива горных пород на стенке выработки $\tau_{0,i,j}^t$ является переменной из-за процесса теплообмена между воздухом и породным массивом. Для ее расчета разработана модель сопряженного теплообмена воздушной среды с породным массивом. Окружающий расчетную ячейку массив горных пород моделируется полым цилиндром. Внутренний радиус цилиндра r_0 равен радиусу горной выработки. Внешний радиус цилиндра R равен радиусу теплового влияния — расстоянию, где температура все время моделирования остается равной естественной температуре непо потревоженного массива. Тепловой поток в породном массиве определяется на основании закона теплопроводности Фурье. Математически задача теплообмена применительно к отдельной расчетной ячейке моделируется плоской с одной радиальной координатой r . Учет изменения температуры массива вдоль выработки обеспечивается совместным решением задачи для всех расчетных ячеек всех ветвей модели. Расчет распределения теплоты в модели массива в каждой отдельной ячейке осуществляется на основе метода конечных объемов. Для этого массив дискретизируется по радиальной координате с заданным шагом Δr . Система решаемых уравнений для расчета распределения температуры в окружающей ячейку массиве горных пород имеет следующий вид

$$\begin{aligned}
& c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta V_{i,j} \cdot (\tau_{l,i,j}^t - \tau_{l,i,j}^{t-1}) \\
& = -\lambda_m \frac{\tau_{l,i,j}^t - \tau_{l-1,i,j}^t}{\Delta r_{l,j}} \cdot S_{l,i,j} \cdot \Delta t \\
& + \lambda_m \frac{\tau_{l+1,i,j}^t - \tau_{l,i,j}^t}{\Delta r_{l+1,j}} S_{l+1,i,j} \Delta t.
\end{aligned} \tag{1.3}$$

Для учета наличия горной крепи или покрытия, нанесенного на контур выработки, с теплофизическими свойствами, отличными от теплофизических свойств массива используется эффективный коэффициент теплоотдачи, который определяется по формуле

$$\alpha_{eff} = \frac{\alpha \cdot \lambda}{\lambda + h} \tag{1.4}$$

где α — коэффициент теплоотдачи на границе «воздух — крепь», Вт/м²·°С; λ — коэффициент теплопроводности материала крепи или покрытия, Вт/м·°С; h — толщина крепи или покрытия, м.

Для расчета распределения влажности воздуха в сети горных выработок в рамках модели идеального вытеснения используется следующее выражение

$$AH_i^{n+1} = AH_i^n + k_e \cdot S_{sur} \cdot \left(1 - \frac{RH_i}{100}\right) \cdot P_{sat}(T_i) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V_i}, \quad (1.5)$$

где AH_i^{n+1} — абсолютная влажность воздуха до испарения влаги на i -ом участке, кг/кг; AH_i^n — абсолютная влажность воздуха после испарения влаги на i -ом участке, кг/кг; k_e — удельный коэффициент влаговыделения, который учитывает эффективную поверхность испарения и изменение скорости испарения от начальной влажности воздуха; RH_i — относительная влажность воздуха на i -ом участке до испарения, %; ΔV_i — выделенный элементарный объем воздуха, м³; Q — расход воздуха в выработке, м³/с.

Для вычисления количества конденсируемой влаги для каждой расчетной ячейки численным методом секущих решается следующее неявное уравнение

$$RH\left(AH - \Delta AH, T + \frac{\Delta AH \cdot L_{water}}{\rho_{air} \cdot c_{air}}\right) = 0, \quad (1.6)$$

где $RH(AH, T)$ — функция вычисления относительной влажности; AH — нескорректированная абсолютная влажность воздуха, кг/кг; ΔAH — искомое количество конденсационной влаги, кг/кг; T — нескорректированная температура воздуха, °С; L_{water} — скрытая теплота испарения воды, Дж/кг.

Если в результате решения уравнения (7) получается, что часть влаги в объеме воздуха расчетной ячейки конденсируется, то производится корректировка значений температуры за счет скрытой теплоты фазовых переходов по следующей формуле

$$T_i^* = T_i - \frac{\Delta AH \cdot L_{water}}{\rho_{air} \cdot c_{air}}. \quad (1.7)$$

В узлах модели для расчета принята модель идеального смешивания, в рамках которой расчет температуры и влажности воздуха в узле производится по выражению

$$T_k = \frac{\sum_{j \in k} T_j \cdot Q_j^{input}}{\sum_{j \in k} Q_j^{input}}, \quad (1.8)$$

$$AH_k = \frac{\sum_{j \in k} AH_j \cdot Q_j^{input}}{\sum_{j \in k} Q_j^{input}},$$

где Q_j^{input} — расход, втекающий в k -ый узел из j -ой ветви, м³/с.

Разработанная модель реализована программно и позволяет производить расчет теплораспределения в сети горных выработок с учетом фазовых переходов влаги.

В завершении выполнена верификация разработанных математических моделей путем сопоставления расчетных графиков измерения температурно-влажностных параметров воздуха в глубоких стволах рудника «Октябрьский» и шахты «Скалистая» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» с данными экспериментальных измерений. На рисунке 3 представлены расчетные графики температур и измеренные значения.

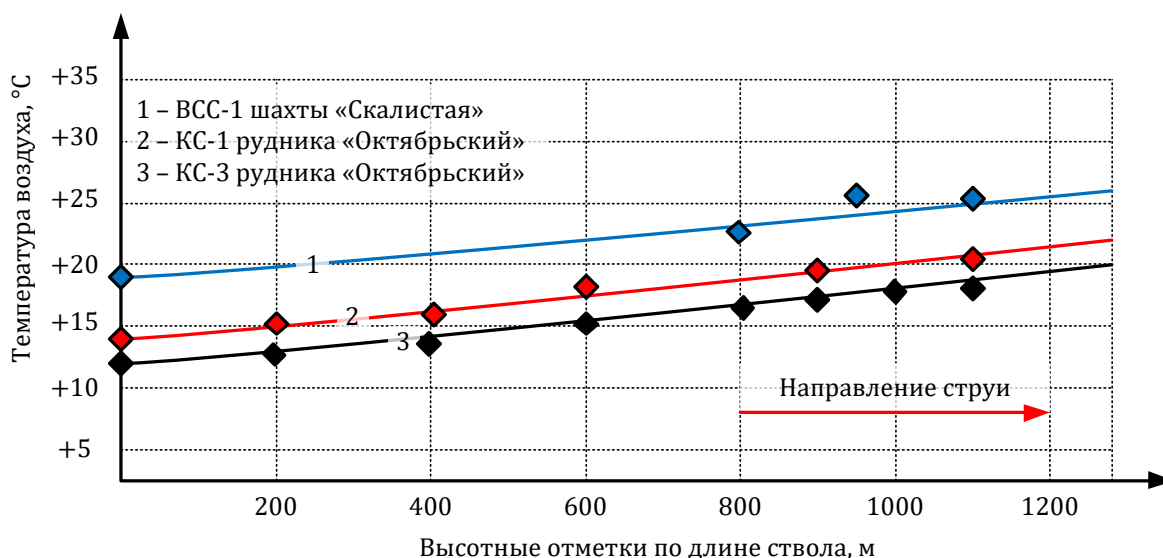


Рисунок 3 — Расчетные графики изменения температуры воздуха и измеренные значения в воздухоподающих стволах шахты «Скалистая» и рудника «Октябрьский»

Согласно приведенным данным наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных кривых.

Разработанные синтезированные математические модели тепло- и воздухораспределения в сети горных выработок, нестационарного сопряженного теплообмена воздуха с породным массивом, фазовых переходов влаги в рудничной атмосфере и тепловыделений от техногенных источников, обеспечивающие построение многофакторных тепловых моделей глубоких шахт и рудников, позволяют исследовать и разрабатывать способы регулирования теплового режима.

II научное положение

Определение оптимальных параметров главных воздухоподающих выработок по критерию минимальных энергетических затрат и применение рециркуляционного проветривания с использованием тепловой ёмкости породного массива позволяют обеспечить стабилизацию и улучшение микроклиматических условий в подготовительных и очистных горных выработках в переходном интервале глубин.

Разработка ресурсосберегающих систем нормализации микроклиматических условий на первом этапе требует обеспечения минимальных теплопритоков в рудничный воздух при его движении от поверхности до подземных рабочих зон.

В работе выполнено решение задачи поиска оптимального радиуса воздухоподающих выработок, обеспечивающего минимальные суммарные затраты на поддержание расхода и тепловые потери в окружающий породный массив, при фиксированном подаваемом расходе воздуха и теплофизических параметрах задачи. Задача поиска оптимального радиуса заключается в минимизации следующего функционала, равного сумме тепловых и аэродинамических потерь

$$\sum_{i=1}^N (R_i(r) \cdot Q_i^3 + Q_i \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot \Delta T_i(r, t)) \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

где N — общее число главных выработок, используемых для подачи воздуха от околоствольного двора до подземных рабочих зон горизонтов; R_i — аэродинамическое сопротивление выработки, кмюрг; r — радиус выработки, являющийся оптимизируемым параметром, м; Q_i — расход воздуха в выработке, подаваемый по выработкам, м³/с; c_a — удельная массовая теплоемкость воздуха, Дж/°С·кг; ρ_a — плотность воздуха, кг/м³; ΔT_i — разница температур между начальной температурой воздуха, поступающей на проветривание горизонта, и конечной, поступающей на проветривание подземных рабочих зон, °С. Установлено, что с возрастанием подаваемого расхода воздуха увеличивается значение оптимального радиуса выработки, значение скорости движения воздуха при этом тоже возрастает. В общем случае оптимальные параметры выработки определяются индивидуально с учетом расхода воздуха, подаваемого по выработкам, и теплофизических параметрам задачи.

В работе выполнены исследования по целесообразности использования теплоизоляционных крепей и оптимальной толщине их нанесения, обеспечивающей минимальный нагрев воздушной струи при одинаковом объеме крепления. В результате исследований доказано, что при малых длинах выработки (до 1500 метров) наиболее целесообразным является убывающий характер нанесения крепи, в таком случае на участках с наибольшим температурным напором между воздухом и породами обеспечивается максимальная теплоизоляция. При больших длинах выработки (свыше 1500 метров) наиболее целесообразным является нанесение крепи с толщиной, возрастающей по длине, поскольку на начальных участках длины выработки образуется приконтурная зона охлажденных пород, позволяющая обеспечивать подачу ненагретого воздуха до теплоизолированных участков, в которых, в свою очередь, нагрев воздушной струи становится менее интенсивным.

В работе выполнено обоснование применения рециркуляционного проветривания в качестве горнотехнического мероприятия регулирования теплового режима. Идея способа состоит в том, что в исходящей вентиляционной струе избыточные тепловыделения от техногенных источников отводятся в окружающий породный массив, а рециркуляционное проветривание позволяет локально увеличить количество воздуха, подаваемое для ассимиляции теплопритоков от источников непосредственно в рабочих зонах. На рисунке 4 приведена схема, поясняющая механизм работы рециркуляционного проветривания как способа снижения температуры воздуха.

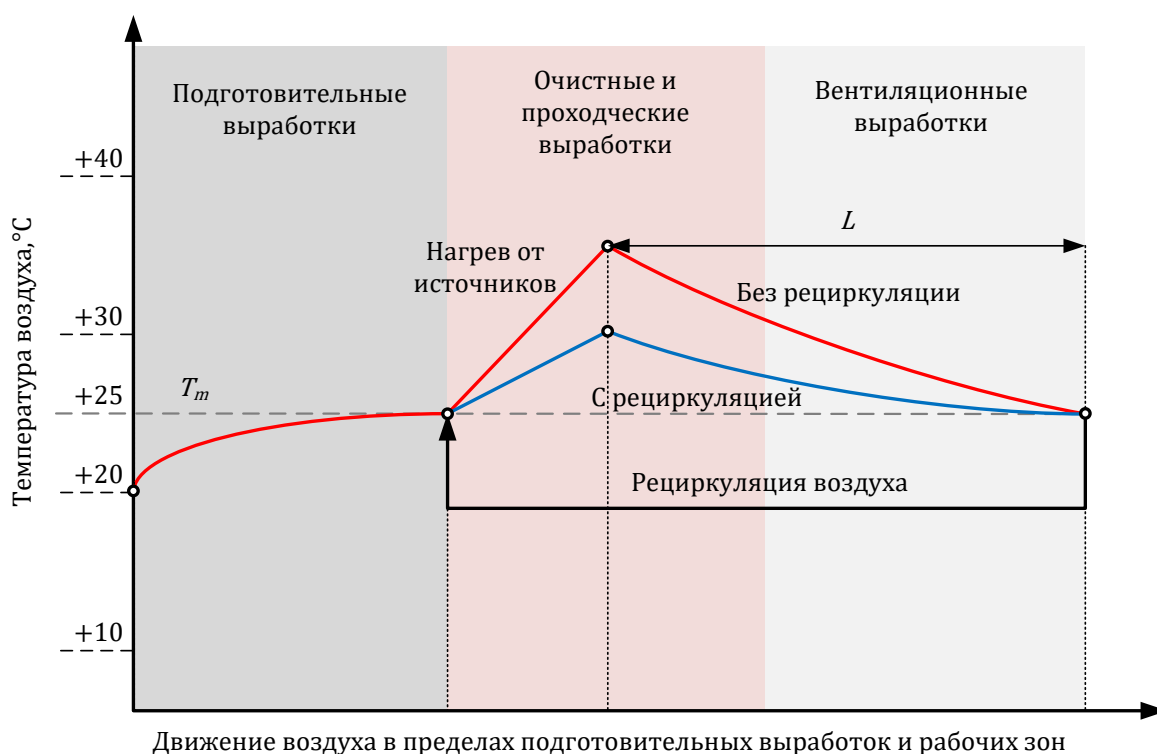


Рисунок 4 — Механизм снижения температуры воздуха за счет рециркуляции

Для оценки целесообразности применения рециркуляционного проветривания необходимо, чтобы результирующая температура после применения рециркуляционного проветривания с максимальным коэффициентом рециркуляции, была равна или меньше требуемой температуры воздуха. Математически это условие эквивалентно выполнению следующего неравенства

$$T_r \geq T_m + \frac{(1 - K_r^{max}) \cdot W}{c \cdot \rho \cdot Q_0}, \quad (2.2)$$

где T_r — требуемая температура воздуха на участке после источника тепловыделения, определяется согласно требованиям нормативных документов, °С; K_r^{max} — мак-

симально допустимый коэффициент рециркуляции, может определяться по ограничениям нормативного характера, а также по факторам газовыделения, пыли и максимальной скорости движения воздуха.

При выполнении неравенства (2.2) коэффициент рециркуляции рассчитывается по тепловому фактору по следующей формуле

$$K_r = 1 - \frac{c \cdot \rho \cdot Q_0 \cdot (T_r - T_m)}{W} \quad (2.3)$$

Необходимым условием эффективного снижения температуры на основе рециркуляционного проветривания является выравнивание температур исходящей струи воздуха до температуры массива горных пород. Из этого условия удаленность рециркуляционной сбойки определяется по формуле

$$L \geq \frac{c \cdot \rho \cdot Q}{P \cdot k_\tau} \ln \left(\frac{T_0 - T_m}{\Delta T} \right), \quad (2.4)$$

где Q — расход воздуха в выработке, м³/с; P — периметр выработки, м; k_τ — коэффициент нестационарного теплообмена между воздухом и массивом горных пород в вентиляционном штреке; ΔT — характерная разница температур воздуха и массива.

Способ рециркуляционного проветривания испытан для снижения температуры воздуха в длинных очистных забоях на панели № 2 Восточного направления горизонта - 440 м рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий», результаты представлены на рисунке 5.

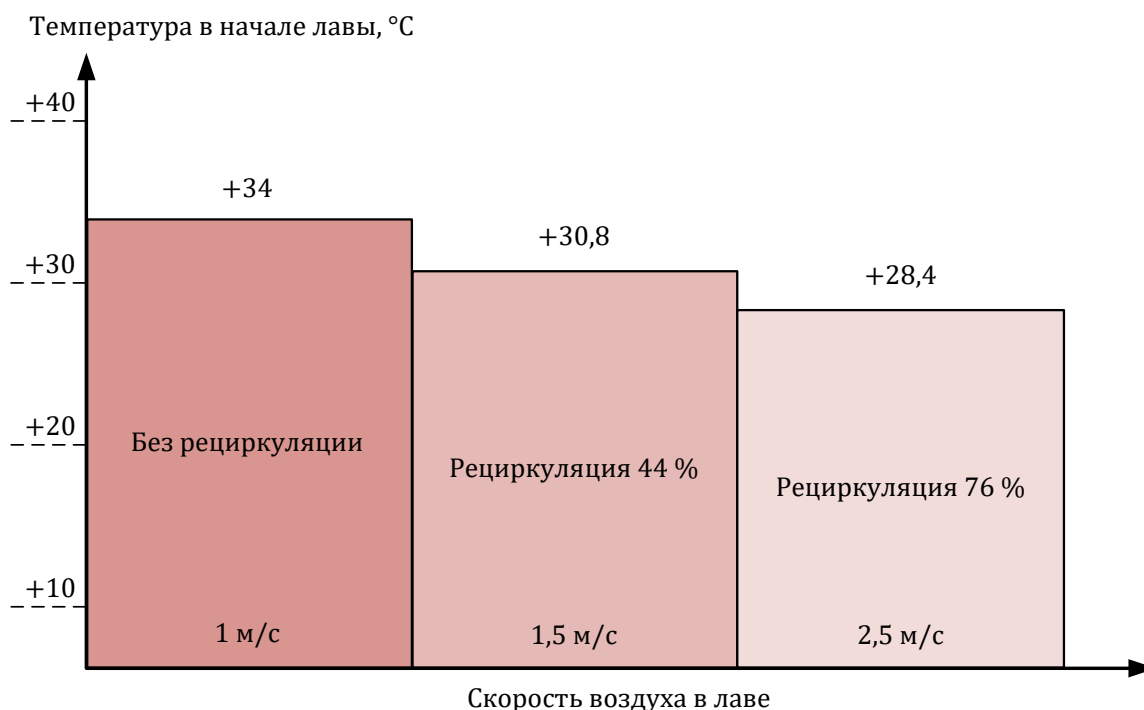


Рисунок 5 — Результаты испытаний рециркуляционного проветривания для снижения температуры в лаве № 2с-3 рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий»

На основании проведенных исследований доказано, что применение систем частичного повторного использования воздуха позволяет улучшить микроклиматические условия за счёт уменьшения нагрева воздушной струи из-за увеличения общего расхода воздуха, ассимилирующего тепловыделения от энергопоезда лавы. Однако эффективность использования рециркуляции ограничена переходным интервалом глубин, когда естественная температура окружающего породного массива не превышает +26 °С, и исходящая струя воздуха полностью успевает охладиться до температуры непо потревоженного массива, что благоприятствует её повторному использованию.

III научное положение

Математическая модель расчета рекуперативных теплообменных аппаратов, учитывающая перекрестную, однонаправленную и противоположно направленную схемы движения теплоносителя и воздушной среды и фазовые переходы влаги, позволяет подбирать оптимальные компоновки и схемы обвязки шахтных теплообменных аппаратов по критерию максимальной удельной теплопередачи.

В подземных системах кондиционирования для охлаждения воздушной среды в воздухоохладителях или ее нагревания при отведении избыточных тепловыделений в подземных градириях повсеместно используются поверхностные теплообменные аппараты. При этом разработку теплообменных аппаратов как элементов системы кондиционирования требуется проводить индивидуально, в зависимости от имеющихся условий и требуемых технических параметров. Для этой цели на начальном этапе проектирования используется математическое моделирование теплообмена между воздухом и теплоносителем при различных вариантах компоновки теплообменных аппаратов. Для этого в работе разработана модель расчета теплообмена в рекуперативных теплообменных аппаратах для всех возможных вариантов течения воздуха и теплоносителя: перекрестного, однонаправленного и противоположно направленного.

Решение для случая перекрестного течения воздуха и теплоносителя имеет вид

$$T_w(x) = T_v^0 + (T_w^0 - T_v^0) \cdot e^{-A \cdot x}, \quad (3.1)$$

в котором введен следующий параметр

$$A = \frac{(1 - C)}{L} \cdot \frac{c_a \cdot q_a}{c_w \cdot q_w}, \quad (3.2)$$

где f_w — сечение трубки течения воды, м²; Δx — длина трубки в пределах одного расчетного объема воздуха, м; ρ_w — плотность воды, кг/м³; c_w — удельная теплоёмкость воды, Дж/кг·°С; T_w^0 — начальная температура воды, °С.

Для случая однонаправленного течения воздуха и теплоносителя решение имеет следующий вид

$$\begin{cases} T_a(\zeta) = T_a^0 \cdot e^{-(A_a+A_w)\zeta} + \left(\frac{T_a^0}{1 + \frac{A_a}{A_w}} + \frac{T_w^0}{1 + \frac{A_w}{A_a}} \right) \cdot (1 - e^{-(A_a+A_w)\zeta}) \\ T_w(\zeta) = T_w^0 \cdot e^{-(A_a+A_w)\zeta} + \left(\frac{T_a^0}{1 + \frac{A_a}{A_w}} + \frac{T_w^0}{1 + \frac{A_w}{A_a}} \right) \cdot (1 - e^{-(A_a+A_w)\zeta}) \end{cases} \quad (3.3)$$

А для случая противоположно направленного течения воздуха и теплоносителя решение получено в виде

$$\begin{cases} T_a(\zeta) = \frac{\alpha \cdot T_{a0} - T_{w0}}{\alpha - 1} + \frac{T_{w0} - T_{a0}}{\alpha - 1} \cdot e^{(A_w - A_a)\zeta} \\ T_w(\zeta) = \frac{\alpha \cdot T_{a0} - T_{w0}}{\alpha - 1} + \frac{\alpha \cdot (T_{w0} - T_{a0})}{\alpha - 1} \cdot e^{-(A_w - A_a)(1-\zeta)} \end{cases}, \quad (3.4)$$

в котором введен безразмерный параметр

$$\alpha = \frac{A_w \cdot e^{A_w}}{A_a \cdot e^{A_a}} \quad (3.5)$$

Расчет охлаждения воздуха производится по аналогичным зависимостям, но в выражение теплового потока добавляется дополнительное слагаемое, учитывающее скрытую теплоту фазового перехода при конденсации влаги из охлаждаемого воздушного потока

$$j_w = - \left| \frac{\Delta V}{\Delta F} \cdot r \cdot \frac{dC_H}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} \right|, \quad (3.6)$$

где r — удельная теплота парообразования, Дж/кг; C_H — концентрация насыщенного пара, кг/м³; T — температура воздуха, °С; ΔV — выделенный объем воздуха, м³; ΔF — поверхность теплообмена, м².

Для параметрического обеспечения математической модели разработан экспериментальный стенд с теплообменными спиральными трубками, пригодными для применения в шахтных теплообменных аппаратах. На стенде проведены экспериментальные исследования тепловых, аэродинамических и гидравлических характеристик теплообменных трубок. На рисунке 6 приведены тепловые характеристики испытанного теплообменного блока. В результате эксперимента также получена экспериментальная зависимость коэффициента теплообмена от скоростей движения теплоносителя и воздуха.

Полученные результаты исследований позволили разработать новый теплообменный аппарат для условий горных выработок рудника, удовлетворяющий следующему набору требований: малые габариты (для размещения в горных выработках горизонта

ведения очистных работ), мобильность (для возможности перемещения за интенсивно движущимся фронтом горных работ), устойчивость к агрессивной среде (рудничный воздух содержит соединения серы и аммиака).

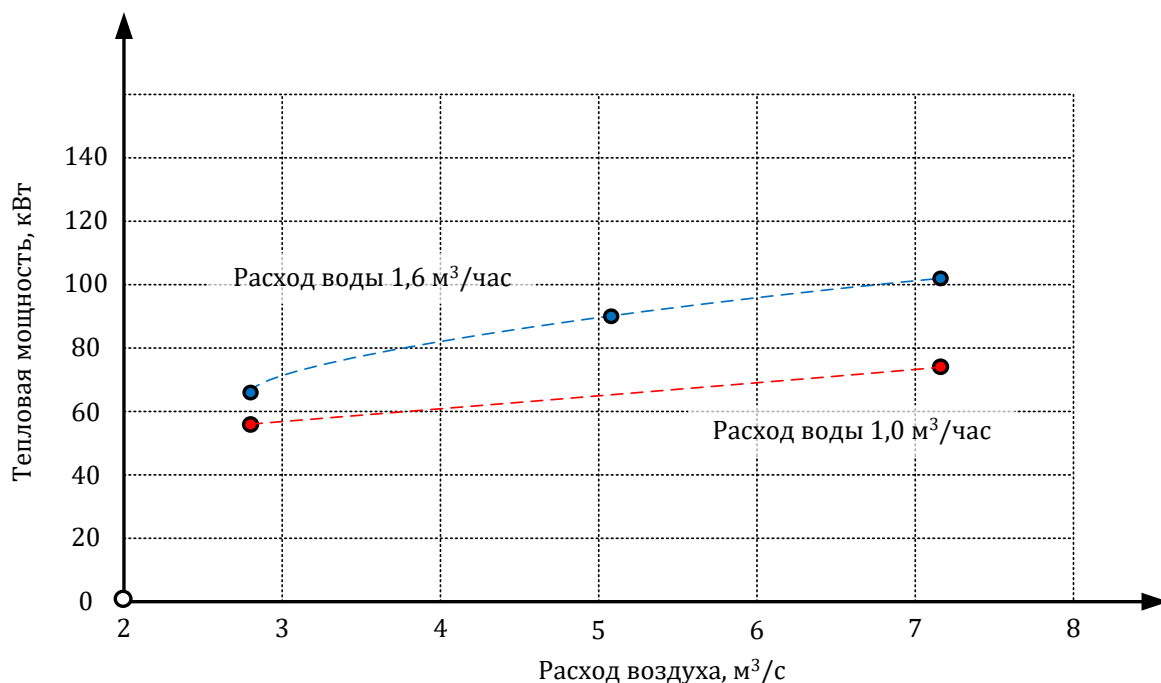


Рисунок 6 — Экспериментальные тепловые характеристики теплообменного блока

На первом этапе разработки теплообменного аппарата решена задача оптимизации компоновки теплообменных модулей и их гидравлической обвязки. Установлено, что при заданном соотношении расходов воздуха и охлаждающей жидкости разные направления их подачи дают более интенсивный теплообмен для сухого и влажного воздуха. Для воздуха средней влажности наблюдается обратный эффект, вызванный тем, что выпадение влаги с выделением теплоты при разнонаправленном движении воздуха и хладоносителя наступает раньше, чем при сонаправленном. Разделение подачи хладоносителя в начало и центр охлаждающей системы также улучшает теплообмен только для воздуха средней влажности по той же причине — более позднего наступления процесса конденсации влаги при более медленном движении жидкости.

В общем случае оптимальная конфигурация подключения теплообменных модулей произвольного типа должна определяться на основании предварительных расчётов в соответствии с разработанной моделью теплообмена.

В результате исследований разработан воздухоохладитель подземной системы кондиционирования воздуха КШР-350Н, представляющий собой рекуперативный тепло-

обменный аппарат с сочетанием перекрестного и противоточного движения хладоносителя и воздуха. Общий вид разработанного теплообменного аппарата приведен на рисунке 7.



Рисунок 7 — Разработанный шахтный теплообменный аппарат

В предложенной конструкции оригинальным решением является применение гофрированных стальных труб малого радиуса навивки, образующих отдельную секцию теплообменного устройства. Секции образуют блочную конструкцию теплообменного аппарата, что обеспечивает отличительную многовариантность схем подключения секций по движению хладоносителя и нетрудоемкую замену секций. Еще одной важной особенностью разработанного аппарата является многовариантность подключения секций и блоков по воде, что позволяет значительно изменять его гидравлическую и тепловую характеристики.

Разработанный воздухоохладитель показал хорошие характеристики теплопередачи в качестве элемента системы кондиционирования КШР-350Н и успешно прошёл шахтные испытания. Измеренный удельный коэффициент теплопередачи составил $143 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, что превышает лучшие зарубежные аналоги на 19 %.

IV научное положение

Технологические схемы нормализации микроклиматических условий в очистных и проходческих горных выработках, заключающиеся в отведении избыточных тепловыделений непосредственно на участках их формирования и локального кондиционирования воздуха в пределах рабочих зон, позволяют обеспечивать требуемые температуры воздуха при минимальной располагаемой холодильной мощности.

В подготовительных и очистных горных выработках происходит интенсивный теплообмен воздуха с породным массивом. Воздух принимает естественную температуру горных пород, и далее происходит его дополнительный нагрев от техногенных источников тепловыделения. При этом нагрев практически не зависит от предварительного охлаждения общей входящей струи воздуха на поверхности или в главных воздухоподающих выработках. В связи с этим возникает задача эффективного местного охлаждения воздуха непосредственно в подготовительных и очистных горных выработках, где находится основное количество рабочих зон с постоянным пребыванием персонала. При этом задача важна вне зависимости от системы хладоснабжения шахты и актуальна как для поверхностных, так и подземных холодильных машин как центрального, так и местного типа.

В работе получено выражение для суммарной холодильной мощности всех местных воздухоохладителей, имеющее следующий вид.

$$H = \sum_{i=1}^N W_i + \sum_{i=1}^N (T_{mi} - T_r) \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot Q_i. \quad (4.1)$$

где T_{mi} — температура нетронутого массива горных пород на глубине i -ой рабочей зоны, °С; c_a — теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С; ρ_a — плотность воздуха, кг/м³; W_i — мощность техногенного источника тепловыделения, кВт.

Задача оптимизации параметров местных воздухоохладителей заключается в минимизации суммарной холодильной мощности воздухоохладителей. При этом оптимизируемыми параметрами являются расходы и требуемая температура воздуха. Мощность техногенных источников тепловыделения определяется типом применяемого оборудования и чаще всего зависит от технологии добычи руды, равно как и температура нетронутого массива горных пород определяется геотермией месторождения и глубиной ведения горных работ.

Выражение (4.1) позволяет сформулировать следующие правила, которыми следует руководствоваться при разработке технологических схем кондиционирования с ми-

нимальной холодильной мощностью: обоснование максимально возможного допустимого значения температуры воздуха и подача в рабочие зоны строго расчетного количества воздуха и обоснование снижения подачи избыточных объемов воздуха на проветривание рабочих зон.

Для условий камерных и слоевых систем разработки рудных месторождений промоделированы различные варианты подачи охлажденного воздуха при одинаковой холодильной мощности. Результаты представлены на рисунке 8.

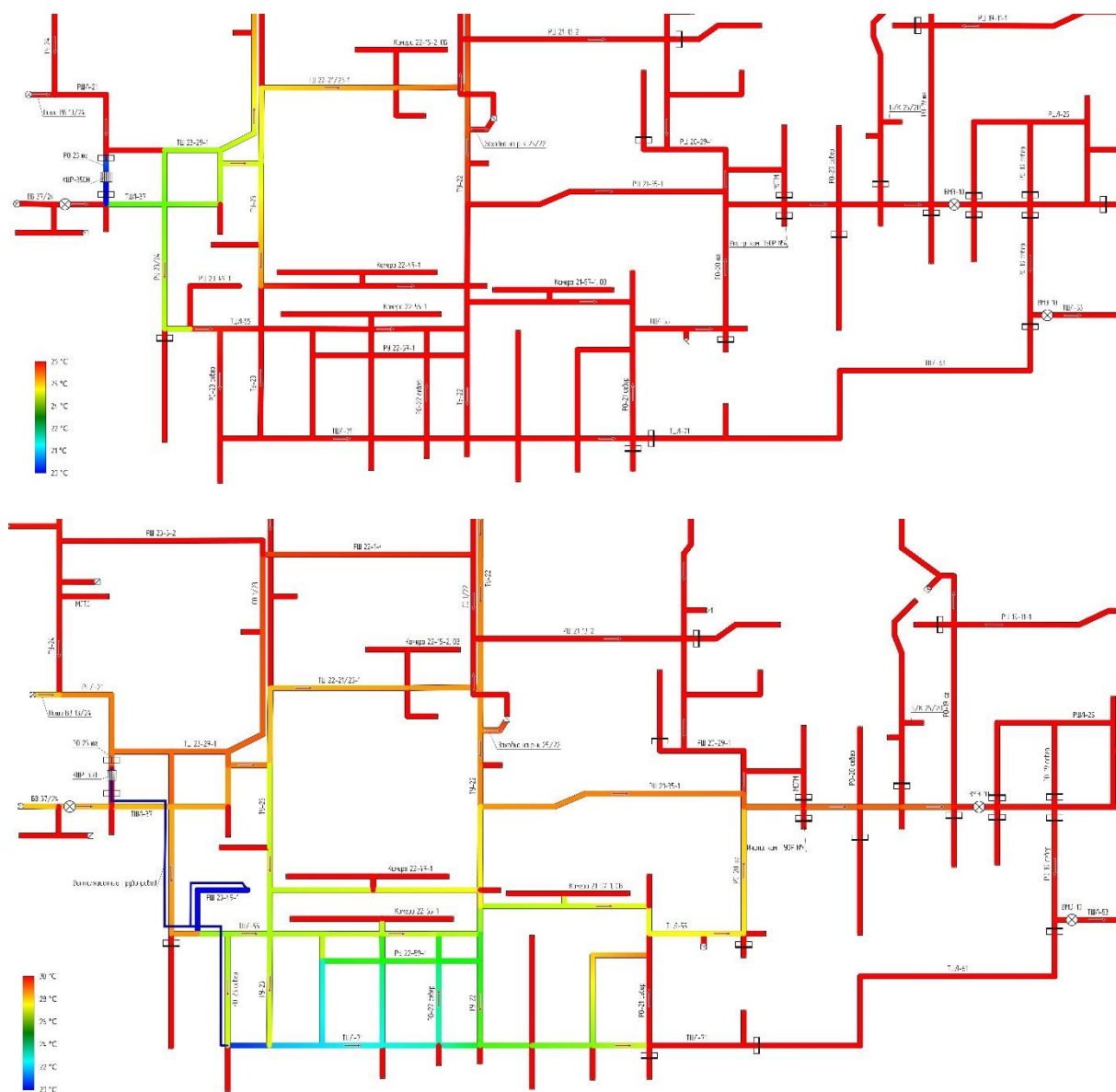


Рисунок 8 — Сравнение эффективности охлаждения воздуха в рабочих зонах в вариантах с и без распределенной подачи охлажденного воздуха

По результатам выполненного моделирования установлено, что наиболее эффективным является вариант распределенной подачи охлажденного воздуха по подземным рабочим зонам — при одинаковой располагаемой мощности он обеспечивает минимальные тепловые потери охлажденного потока воздуха в окружающий породный массив.

Экспериментальные испытания разработанной технологической схемы кондиционирования выполнены на руднике «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» — на сегодняшний день это самый глубокий рудник нашей страны, в котором горные работы ведутся на глубине до 1800 метров, а температура воздуха в горных выработках достигает +45 °С. Для испытаний разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию подземная система кондиционирования воздуха КШР-350Н.

На рисунке 9 представлена разработанная система кондиционирования КШР-350Н, установленная в горных выработках подсечного горизонта шахты № 3 рудника «Таймырский».



Рисунок 9 — Разработанная система кондиционирования КШР-350Н, установленная в руднике «Таймырский».

В ходе исследований испытаны различные варианты подачи охлажденного воздуха — от локального охлаждения всего воздушного потока до распределенной подачи воздуха по горным выработкам с помощью воздухораспределительных устройств и воздухопроводов. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Эффективность охлаждения горных выработок при различных режимах испытаний подземной установки кондиционирования.

Участок	Режимы испытаний			
	Без охлаждения	Локальное охлаждение	Охлаждение тупиковой выработки	Распределенная подача
Тупиковая выработка	26,8 °С	27,8 °С	20,9 °С	22,9 °С
Сквозная выработка	27,7 °С	25,7 °С	26,1 °С	25,4 °С

Результаты проведенных испытаний разработанной системы кондиционирования КШР-350Н в условиях глубоких залежей рудника «Таймырский» подтверждают полученный вывод о том, что максимальная эффективность достигается распределенной подачей воздуха по подземным рабочим зонам.

V научное положение

Ресурсосберегающие системы регулирования теплового режима глубоких рудников разрабатываются на основе решения задачи оптимизации выбора мест и параметров охлаждения воздуха и отведения избыточной теплоты по критерию минимального энергопотребления с применением комплексного параметра нормирования микроклиматических условий, учитывающего совместное влияние температуры, влагосодержания и скорости движения воздуха на охлаждающую способность рудничной атмосферы.

Современные глубокие шахты и рудники отличаются сложными системами вентиляции, топологией сетей горных выработок, высокими мощностями добычи полезных ископаемых, сложными геологическими и горнотехническими условиями работы. Решение задачи нормализации микроклиматических условий в сети горных выработок глубоких рудников требует разработки комплексных технических систем, отличающихся оптимальными капитальными и эксплуатационными затратами с учетом индивидуальных особенностей шахты или рудника. Основными критериями разработки систем управления тепловым режимом глубоких рудников являются эффективность обеспечения допустимых микроклиматических параметров рудничной атмосферы в горных выработках, оптимальное сочетание капитальных и эксплуатационных затрат, надежность функционирования.

Согласно выражению (4.1) обоснование адекватной системы нормирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников, исключая избыточные запасы параметров, является первоочередной задачей разработки ресурсосберегающих систем. В работе на основе обширного обзора параметров нормирования микроклимата в нашей стране и за рубежом и анализа функциональных зависимостей обоснован комплексный критерий нормирования микроклиматических условий, учитывающий температуру, относительную влажность и скорость движения воздушной среды

$$T_{ef} = t_d + 0,00653 \cdot \varphi \cdot (t_d - 9,06) - 0,7 \cdot v - 4. \quad (5.1)$$

где t_d — температура воздуха по сухому термометру, °С; φ — относительная влажность, %; v — скорость воздуха, м/с.

На следующем этапе решена задача выбора, комплексирования и определения параметров применения отдельных способов регулирования теплового режима. Она решается на основе метода вариантов, с использованием численного моделирования сопряженных процессов тепло- и воздухораспределения в сети горных выработок с учетом термодинамических факторов, влияющих на микроклиматические условия рудничной атмосферы. Технологическими компонентами комплексных систем нормализации микроклиматических условий являются разработанные в работе горнотехнические способы и ресурсосберегающие технологические схемы кондиционирования, эффективность которых зависит от глубины, а, в конечном итоге, от температуры горных пород и типа горных выработок. Схематично эта зависимость представлена на рисунке 10. Определение областей эффективности различных мероприятий по представленной диаграмме в координатных осях «температура массива горных пород — удаленность рабочих зон по тракту движения воздуха» осуществляется на основе многовариантного численного моделирования на тепловой модели рудника с учетом его индивидуальных особенностей. На основании выполненного уточнения определяются группы эффективных способов для различных рабочих зон.

На следующем этапе производится оптимизация параметров горнотехнических мероприятий на основе численного моделирования на тепловой модели рудника и расчета суммарных энергетических и тепловых потерь по каждому варианту. Для оценки горнотехнических мероприятий регулирования теплового режима с точки зрения эксплуатационных затрат производится суммарный расчет энергетических затрат за счет холодопотерь воздушной струи (ее нагревания за счет теплопритоков) и аэродинамической мощности на поддержание заданного расхода по следующей формуле

$$\sum_{i=1}^N (R_i \cdot Q_i^3 + Q_i \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot \Delta T_i) \rightarrow \min, \quad (5.2)$$

где N — общее число главных выработок, используемых для подачи воздуха от околоствольного двора до подземных рабочих зон горизонтов.

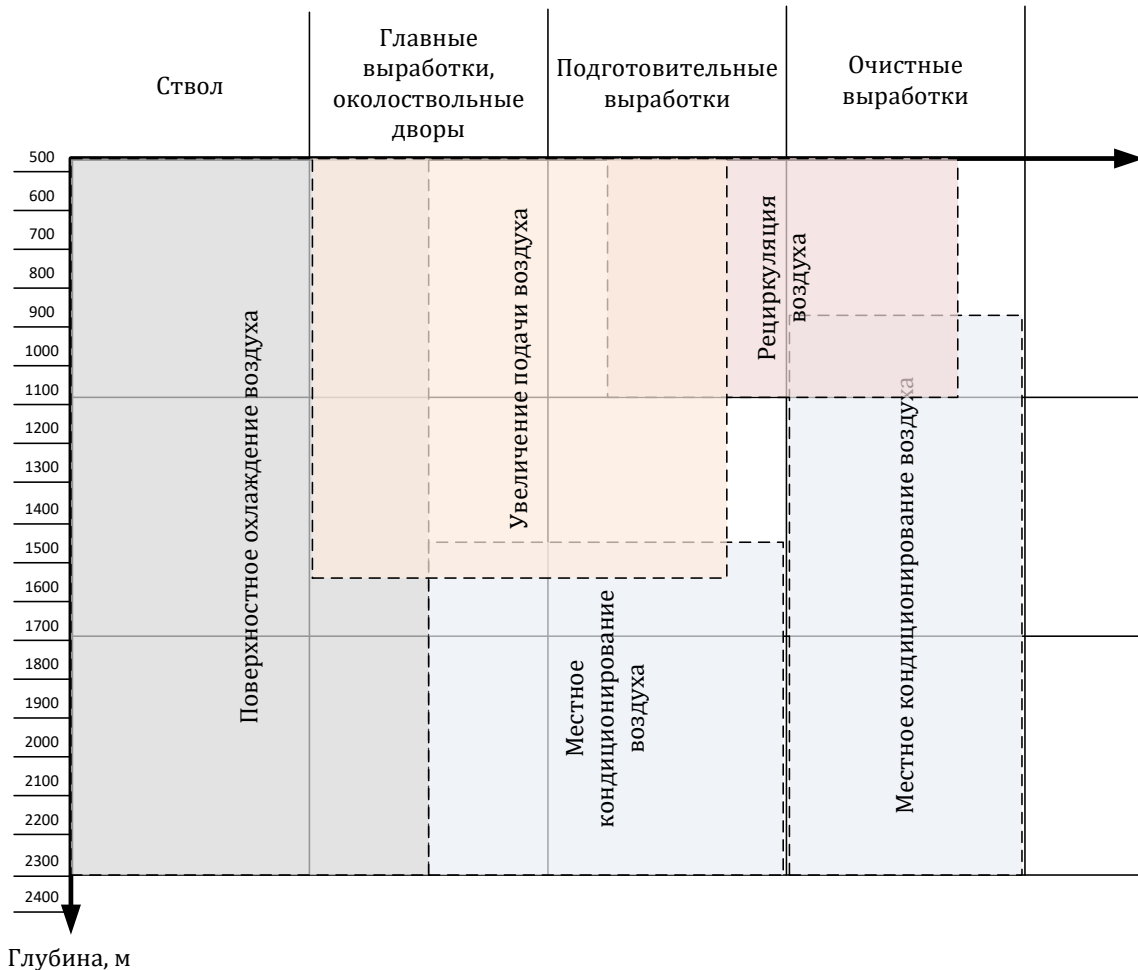


Рисунок 10 — Диаграмма к определению эффективных мероприятий регулирования теплового режима

На следующем этапе, когда возможности улучшения микроклиматических условий за счет применения общего охлаждения поступающей воздушной струи и горнотехнических мероприятий исчерпаны, требуется разработка мероприятий по местному кондиционированию воздуха в подземных рабочих зонах.

Для этого необходимо моделирование различных вариантов использования теплотехнических вариантов, расчет эффективности и эксплуатационных затрат при их применении. Дополнительно при оценке теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима с точки зрения эксплуатационных затрат производится суммарный расчет энергетических затрат на работу и обслуживание технических средств систем кондиционирования воздуха по следующему выражению

$$\sum_{i=1}^N (K_{Ni} \cdot W_i^R + N_i^F + N_i^P) \rightarrow \min, \quad (5.3)$$

где N — общее число холодильных машин в разрабатываемой системе кондиционирования; W_i^R — холодильная мощность i -ой холодильной машины, кВт; K_{Ni} — безразмерный коэффициент холодильной мощности, равный отношению электрической мощности холодильной машины к холодильной, зависит от типа оборудования и условий его работы и варьируется в интервале от 0,4 до 1; N_i^F — суммарная мощность вентиляторов, обеспечивающих проток воздуха через систему теплообменных аппаратов i -ой холодильной машины, кВт; N_i^P — суммарная мощность насосов, обеспечивающих проток масла, тепло- и хладоносителей в i -ой холодильной машине, кВт.

Определение эффективности как горнотехнических, так и теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима должно осуществляться в соответствии с применяемой системой нормирования микроклиматических условий и требованиями нормативных документов, то есть рассчитанные и принятые значения микроклиматических параметров воздуха должны удовлетворять следующим неравенствам

$$+2 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T(T, v, \varphi) \leq T_{ef}^{max}(T, v, \varphi),$$

$$v_{min} \leq v \leq v_{max}.$$

Завершающий этап разработки комплексной системы нормализации микроклиматических условий заключается в выборе технологической схемы кондиционирования и способа отведения избыточных тепловыделений. Для решения этой задачи разработана общая классификация систем кондиционирования воздуха с различными вариантами отведения избыточных тепловыделений, которая представлена на рисунке 11.

Разработанные методические, технологические и программные средства применены при разработке ресурсосберегающей системы нормализации микроклиматических условий в шахте «Глубокая» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». На строящейся шахте «Глубокая» глубина ведения горных работ достигает 1700-2100 метров, температура пород достигает +53,4 °С. Климат района субарктический, характеризуется отрицательной среднегодовой температурой воздуха (-9,8 °С), продолжительным холодным периодом (248 дней) с сильными морозами и метелями, средняя месячная температура воздуха наиболее холодного месяца -28,2 °С. Особенностью разработки системы нормализации микроклиматических условий для шахты «Глубокая» является наличие построенной поверхностной системы подготовки воздуха на воздухоподающем стволе, обеспечивающей подогрев воздуха в холодный период года и охлаждение воздуха в теплый период года с холодильной мощностью 11 МВт.

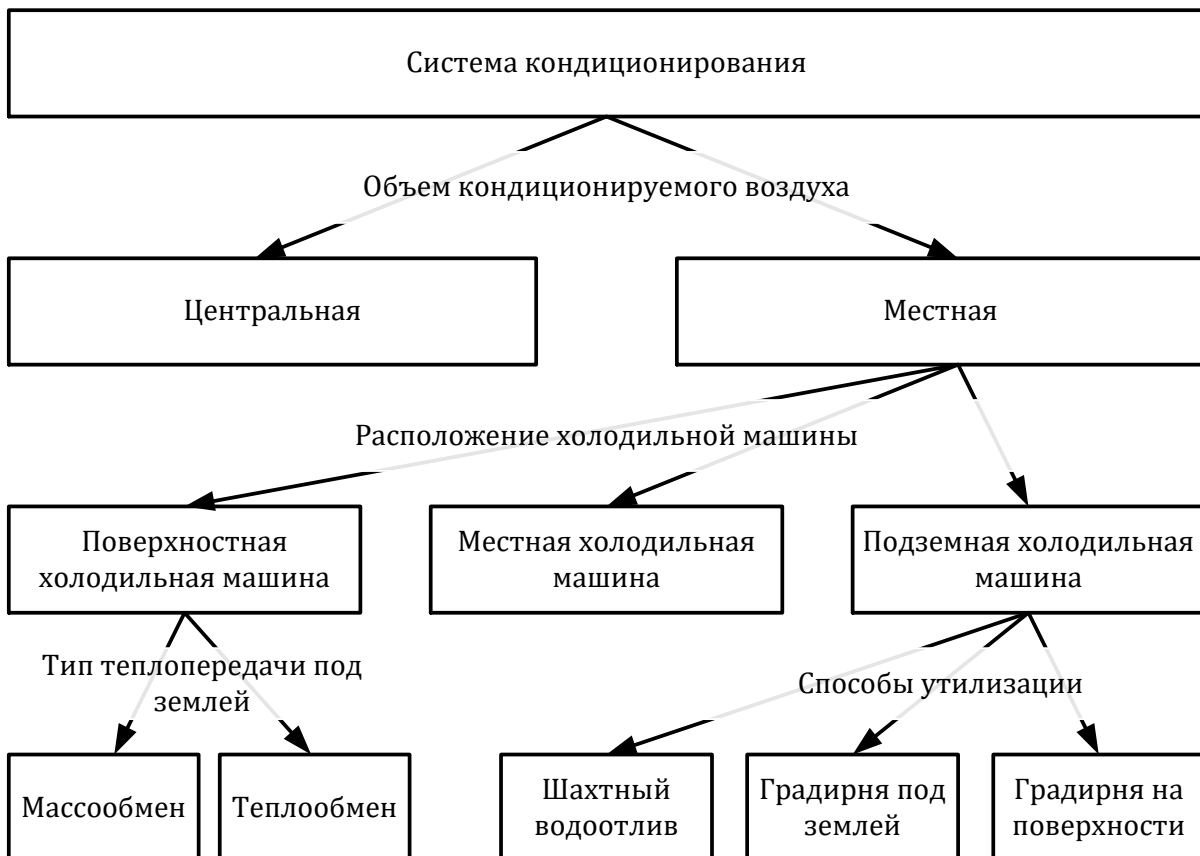


Рисунок 11 — Классификация систем кондиционирования воздуха

Прогнозное теплораспределение во всех выработках на максимальное развитие горных работ представлено на рисунке 12. Согласно результатам моделирования воздух, поступающий на проветривание в горные выработки, достигает температуры $+16,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на сопряжении ствола с откаточным горизонтом за счет гидростатического сжатия даже несмотря на его охлаждение до $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ на поверхности. Установлено, что даже с учетом круглогодичной работы поверхностной системы кондиционирования температура воздуха не превышает предельно-допустимых значений $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$ только в выработках околоствольных дворов воздухоподающего ствола. Во всех остальных рабочих зонах за счет теплообмена воздуха с породным массивом и техногенных источников теплоты наблюдается превышение допустимой температуры воздуха. Максимальное значение температуры воздуха составляет $+54,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ в подготовительной тупиковой выработке залежи С-5 (наиболее отдаленный участок шахты).

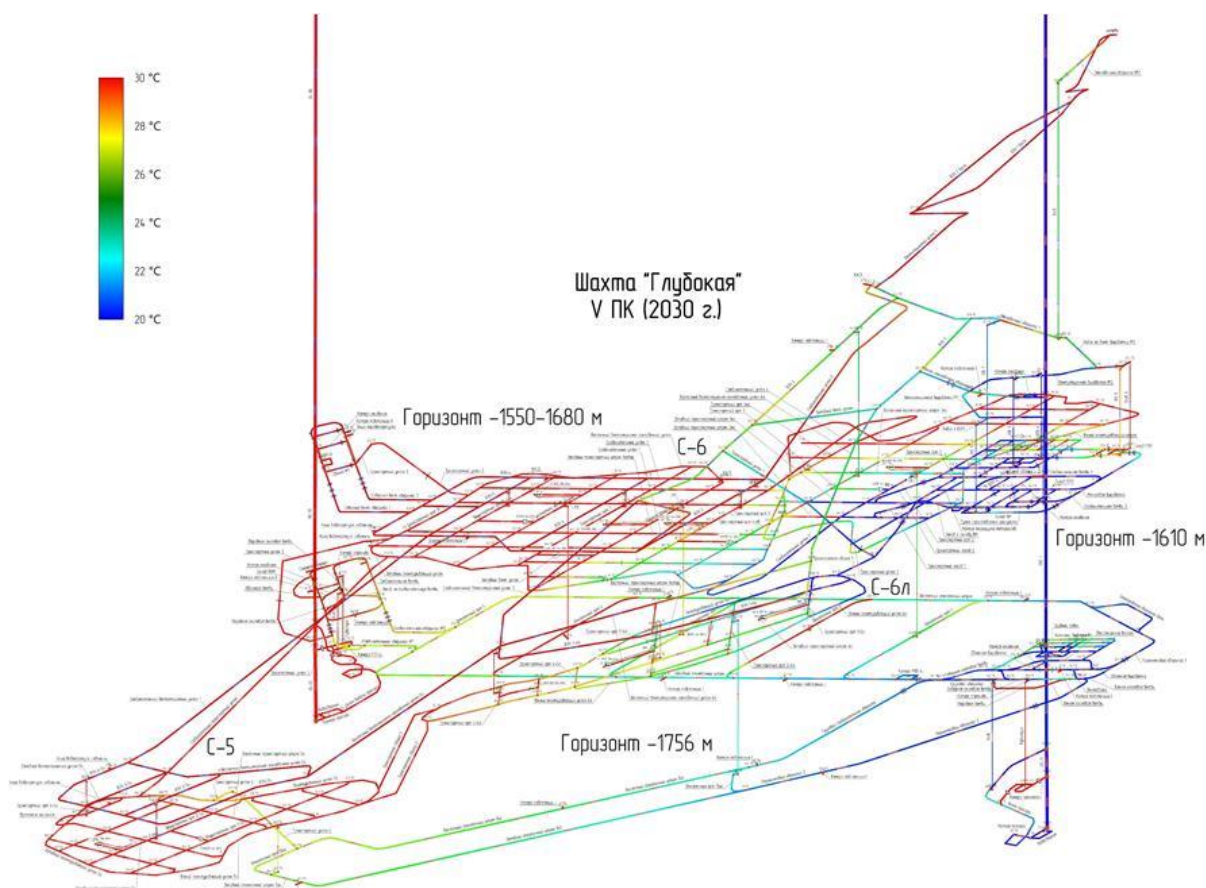


Рисунок 12 — Прогнозная температурная карта шахты «Глубокая» на максимальный период развития горных работ

Согласно разработанной методике выполнено исследование горнотехнических и теплотехнических мероприятий по охлаждению рудничного воздуха в горных выработках шахты для обеспечения теплового режима во всех рабочих зонах на все периоды развития горных работ. На основании результатов численного моделирования проведен сравнительный анализ эффективности различных технических мероприятий регулирования теплового режима шахты «Глубокая». Установлено, что достичь требуемой температуры воздуха во всех рабочих зонах шахты можно только за счет местного охлаждения воздуха. В результате с помощью расчетов параметров местного охлаждения воздуха в рабочих зонах установлено, что на период максимального развития горных работ требуемая мощность системы кондиционирования составит 5783 кВт.

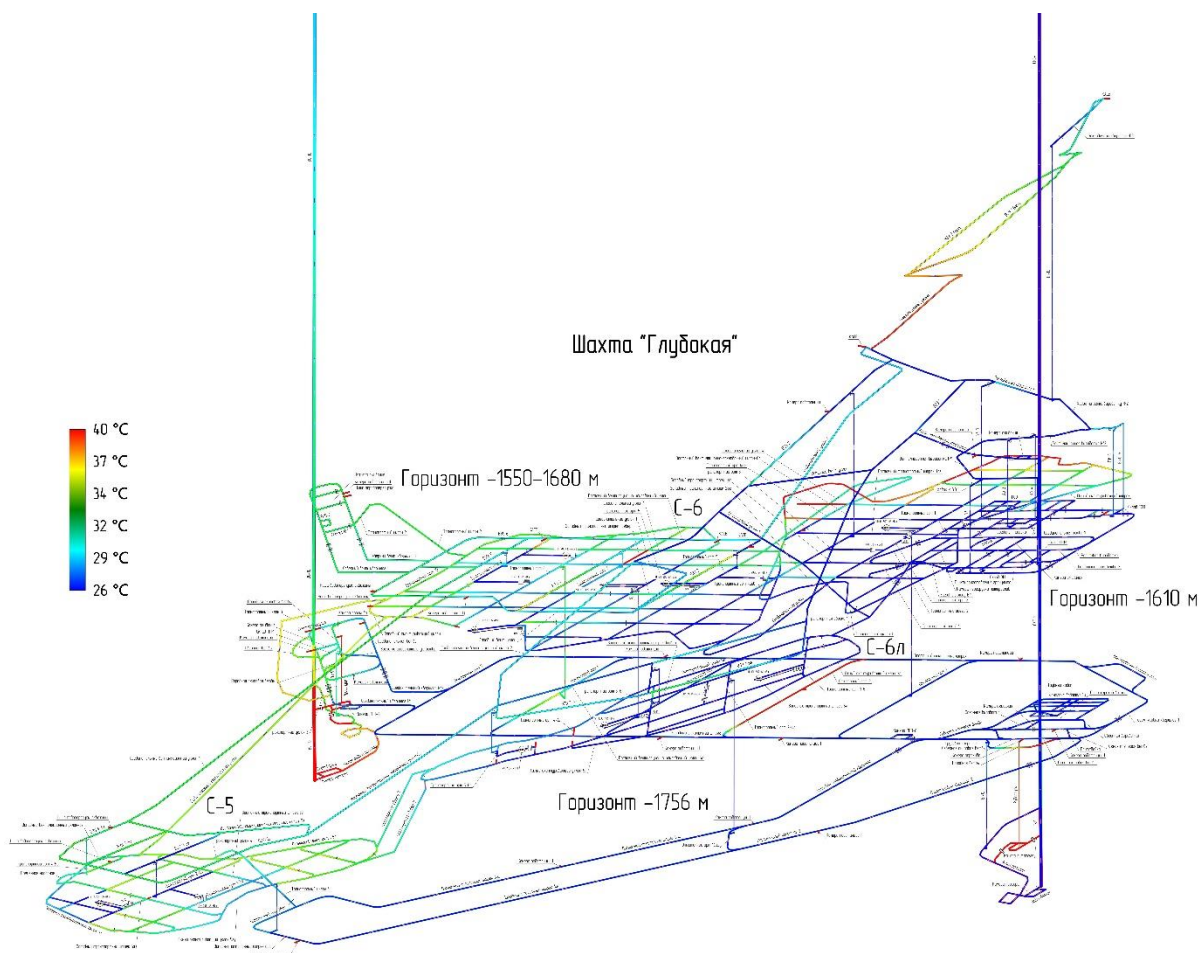


Рисунок 13 — Распределение температуры воздуха в шахте «Глубокая» при применении местного охлаждения воздуха

Использование систем кондиционирования воздуха предполагает многовариантность способов размещения и режимов использования средств охлаждения воздуха и отведения теплоты. Выбор той или иной системы кондиционирования рудничного воздуха зависит от климатических условий района строительства, технологического процесса добычи, вентиляционных режимов, сроков ввода мощностей в эксплуатацию, темпов отработки месторождения, доступности энергоресурсов и определяется на основании технико-экономического сравнения вариантов систем. Для условий шахты «Глубокая» рассмотрены все возможные варианты: подземное и наземное размещение центральной холодильной машины, применение местных холодильных машин, схемы с отведением избыточной теплоты либо в систему главного водоотлива, либо в атмосферу на поверхности. Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 3. Важной особенностью является то, что каждый из вариантов рассчитан на одинаковую холодильную мощность 5783 кВт и согласно результатам расчета одинаковая холодильная мощность обеспечивается комплексами, существенно различающимися по суммарной установленной электрической мощности и годовому энергопотреблению.

Таблица 3 — Сравнительный анализ энергоэффективности различных систем кондиционирования воздуха для обеспечения холодопроизводительности 5783 кВт

	Поверхностная атмосфера	Рудничная атмосфера	Шахтных водоотлив
Центральная холодильная машина на поверхности	559,1 кВт 4,9 МВт·ч	—	—
Центральная холодильная машина под землей	3349,4 кВт 29,3 МВт·ч	Не достаточно мощности отведения теплоты	5400 кВт 47,3 МВт·ч
Местная холодильная машина	—	Не достаточно мощности отведения теплоты	6480 кВт 56,7 МВт·ч

Из приведенных результатов расчета следует, что наиболее целесообразным и выгодным вариантом является поверхностное размещение холодильной машины с градирней на промплощадке вентиляционного ствола. Это объясняется тем, что требуемую большую холодильную мощность большую часть года можно будет обеспечивать за счет холодного климата региона, без дополнительных затрат электроэнергии.

Таким образом, построение систем нормализации микроклиматических параметров, основанное на численном моделировании процессов тепло- и воздухораспределения, позволяет разрабатывать комплексные системы кондиционирования воздуха, отличающиеся эффективностью и оптимальным сочетанием капитальных и эксплуатационных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические и технологические основы построения ресурсосберегающих систем управления тепловым режимом подземных рудников. Совокупность результатов диссертационной работы можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы по обеспечению безопасных условий труда в подземных рабочих зонах при разработке глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых, освоение которых имеет важное хозяйственное значение для экономики страны.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Выполнены экспериментальные исследования техногенных источников тепловыделения в условиях глубоких рудников, в результате которых получены количественные характеристики тепловыделений от технологического оборудования и нагрева воздуха в рабочих зонах.
2. Разработана классификация горных выработок глубоких рудников по основным факторам формирования теплового режима на основе экспериментальных и теоретических исследований процессов воздухо- и теплораспределения в сети горных выработок глубоких рудников.
3. Разработаны способы регулирования теплового режима за счет определения технологических параметров воздухоподающих выработок, обеспечивающих минимальные теплоступления при движении воздушной струи в условиях высоких температур породного массива.
4. Разработан способ улучшения микроклиматических параметров воздуха в горных выработках на основе организации рециркуляционного проветривания участка и теплового взаимодействия между рудничным воздухом, массивом горных пород и источниками тепловыделения.
5. Выполнены опытно-промышленные испытания горнотехнического способа нормализации микроклиматических условий в горных выработках на примере применения рециркуляционного проветривания на руднике 4 РУ ОАО «Беларуськалий», в результате которого доказана эффективность рециркуляции для снижения температуры воздуха и стабилизации температурно-влажностных параметров в

подготовительных и очистных выработках при отработке запасов полезных ископаемых в переходном интервале глубин с температурой массива горных пород до +26 °С.

6. Разработана математическая модель расчета рекуперативных теплообменных аппаратов, учитывающая пространственное распределение термодинамических параметров сред, участвующих в теплообмене, компоновочную схему аппарата и фазовые переходы тепло- или хладоносителя.
7. Выполнены экспериментальные и теоретические исследования по созданию теплообменных аппаратов для охлаждения и нагревания воздуха с большими удельными коэффициентами теплообмена, на основе которых разработан высокоэффективный теплообменный аппарат для мобильных подземных систем кондиционирования воздуха.
8. Обоснованы технологические схемы кондиционирования воздуха и отведения избыточных тепловыделений от оборудования при системах разработки с короткими и длинными очистными забоями, обеспечивающие нормализацию микроклиматических условий в подземных рабочих зонах при минимальных холодильных мощностях систем.
9. Разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию подземная система кондиционирования воздуха КШР-350Н для нормализации микроклиматических условий в горных выработках при отработки глубокозалегающих залежей на руднике «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»».
10. Разработаны технологические и алгоритмические основы, критерии и программные средства для разработки ресурсосберегающих систем нормализации микроклиматических условий в горных выработках рудников с учетом их индивидуальных особенностей и комплексного критерия нормирования микроклиматических условий, учитывающего совместное влияние температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха.
11. На основании результатов исследований разработаны ресурсосберегающие комплексные системы нормализации микроклиматических параметров в шахте «Глубокая» и руднике «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»» в качестве исходных данных для проектной документации на отработку глубоких залежей С-2, С-5, С-5л, С-6 и С-6л, С-3 и С-4 Октябрьского месторождения сульфидных медно-никелевых руд.

**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. Оптимизация теплогазодинамических расчетов топологически сложных вентиляционных сетей / Б.П. Казаков, А.В. Зайцев, Е.Л. Гришин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — МГГУ, 2011. — № 4. — С. 191-194.
2. Казаков, Б.П. Особенности расчета теплового режима глубоких рудников при применении систем разработок с полной закладкой выработанного пространства / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. — № 2. — С. 195-198
3. Шалимов, А.В. Учет инерционных сил движения воздуха при нестационарных расчетах воздухораспределения в вентиляционной сети / А.В. Шалимов, А.В. Зайцев, Е.Л. Гришин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — МГГУ, 2011. — № 4. — С. 218-222.
4. Kruglov, Yu.V. Calculation method for the unsteady air supply in mine ventilation networks / Yu.V. Kruglov, L.Yu. Levin, A.V. Zaitsev // Journal of Mining Science. — 2011. — vol.47. — № 5. — P. 651-659.
5. Казаков, Б.П. Нестационарный сопряженный теплообмен между рудничным воздухом и горным массивом в условиях глубоких рудников / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — Екатеринбург, 2013. — № 1. — С. 26-32
6. Казаков, Б.П. Формирование микроклиматических параметров атмосферы в воздухоподающих стволах и главных выработках глубоких рудников / Б.П. Казаков, А.В. Зайцев, М.А. Семин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — МГГУ, 2013. — № 8. — С. 167-171
7. Левин, Л.Ю. Численное решение сопряженной задачи теплораспределения в рудничной атмосфере и окружающем породном массиве для сети горных выработок произвольной топологии / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, А.В. Зайцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — МГГУ, 2013. — № 8. — С. 176-180
8. Казаков Б.П. Исследование работы системы оптимального управления проветриванием на испытательном стенде / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Горный

- информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — МГГУ, 2013. — № 12. — С. 169-173
9. Karelin, V.N. Features of forming microclimatic conditions in mining excavations of deep mines / V.N. Karelin, A.V. Kravchenko., L. Yu. Levin, B.P. Kazakov, A.V. Zaitsev // *Eurasian Mining*. — 2013. — № 2. — P. 35-38
 10. Levin, L. Yu. Mathematical methods of fore-casting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations / L. Yu. Levin, M. A. Semin, A.V. Zaitsev // *Journal of Mining Science*. — 2014. — vol. 50. — № 2. — P. 371-378
 11. Казаков, Б.П. Современные подходы к разработке способов управления тепловым режимом рудников при высокой температуре породного массива / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев // *Горный журнал*. — Москва, 2014. — № 5. — С. 22-25
 12. Зайцев, А.В. Аналитическое решение задачи расчета распределения температуры воздуха в горных выработках при наличии рециркуляционных потоков / А.В. Зайцев, Ю.А. Клюкин, Н.А. Трушкова // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. — МГГУ, 2014. — № 9. — С. 190-194
 13. Левин, Л.Ю. Комплексные решения обеспечения безопасных условий труда в условиях теплового режима глубоких рудников Севера / Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. — МГГУ, 2015. — № 30. — С. 291-299
 14. Казаков, Б.П. Оптимизация компоновки теплообменных модулей в системах кондиционирования рудничного воздуха / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. — Екатеринбург, 2015. — № 7. — С. 116-125
 15. Зайцев, А.В. Исследование критериев нормирования микроклиматических условий в горных выработках / А.В. Зайцев, М.А. Семин, Ю.А. Клюкин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. — МГГУ, 2015. — № 12. — С. 151-156
 16. Казаков, Б.П. Влияние процессов испарения и конденсации влаги на тепловой режим глубоких рудников / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // *Горный журнал*. — Москва, 2016. — № 3. — С. 73-76
 17. Казаков, Б.П. Разработка энергосберегающих систем вентиляции и кондиционирования современных горнодобывающих предприятий / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — МГГУ, 2015. — Специальный выпуск 60-2 «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование-2». — С. 294-298

18. Казаков, Б.П. Исследование процессов миграции конденсационных рассолов в выработках калийных рудников / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — МГГУ, 2016. — № 1. — С. 216-225
19. Казаков, Б.П. Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Записки Горного института. — Санкт-Петербург, 2017. — Т. 223. — С. 116-124
20. Левин, Л.Ю. Оценка опасности применения фреоновых холодильных машин в подземных системах кондиционирования воздуха / Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев, Е.В. Колесов, С.В. Бутаков // Безопасность труда в промышленности. — Москва, 2017. — № 8. — С. 28-32.
21. Зайцев, А.В. Теплотехнические системы нормализации микроклиматических параметров воздуха в глубоких рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» / А.В. Зайцев, Л.Ю. Левин, С.В. Бутаков, М.А. Семин // Горный журнал. — Москва, 2018. — № 6. — С. 34-39.
22. Левин, Л.Ю. Нормализация микроклиматических условий горных выработок при отработке глубокозалегающих запасов калийных рудников // Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев, С.В. Бутаков, М.А. Семин // Горный журнал. — Москва, 2018. — № 8. — С. 97-102.

патенты и свидетельства об официальной регистрации

23. Патент № 2587192 Российская Федерация. Способ мониторинга расходов воздуха в сети горных выработок и система для его осуществления / Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Мальков П.С., Кормщиков Д.С.; заявитель и патентообладатель ГИ УрО РАН. — № 2014147769/03; заявл. 26.11.14; опубл. 20.06.16, Бюллетень № 17. — 3 с.
24. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «Аналитический комплекс «АэроСеть»: № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН. — № 2015610589; заявл. 24.04.14; дата регистрации 14.01.15. — 1 с.
25. Патент № 2509895 Российская Федерация. Способ кондиционирования воздуха и охлаждения технологических сред оборудования при добыче полезных ископаемых подземным способом / Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Ковалев А.В.; заявитель и патентообладатель ГИ УрО РАН. — № 2015125884/03; заявл. 29.06.15; опубл. 20.12.16, Бюллетень № 35. — 2 с.

26. Патент № 2611770 Российская Федерация. Способ кондиционирования воздуха в горных выработках / Левин Л.Ю., Зайцев А.В.; заявитель и патентообладатель Левин Лев Юрьевич, Зайцев Артем Вячеславович. — № 2015125852; заявл. 29.06.15; опубл. 01.03.17, Бюллетень № 7. — 2 с.

публикации в других изданиях

27. Зайцев, А.В. Структурно-классификационный анализ аэрологических методов расчета для условий различных рудников / А.В. Зайцев, Е.Л. Гришин // Научные исследования и инновации. — Пермь, 2011. — Т. 5. — № 2. — С. 133-135
28. Гришин, Е.Л. Классификация тепловых источников по степени влияния на надежность воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях / Е.Л. Гришин, А.В. Зайцев // Научные исследования и инновации. — Пермь, 2011. — Т. 5. — № 1. — С. 156-158
29. Левин, Л.Ю. Использование программного модуля ANSYS CFX при решении научно-производственных задач проветривания шахт и рудников / Л.Ю. Левин, Р.Р. Газизуллин, А.В. Зайцев // САПР и графика. — 2011. — № 10 (180). — С. 64-66
30. Казаков, Б.П. Влияние закладочных работ на формирование теплового режима в горных выработках в условиях рудников ОАО «Норильский никель» / Б.П. Казаков, А.В. Зайцев, А.В. Шалимов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — Пермь, 2012. — Т. 11. — № 2. — С. 110-114.
31. Казаков, Б.П. Применение частичного повторного использования воздуха для снижения количества выпадающей влаги в калийных рудниках / Б.П. Казаков, Н.А. Трушкова, А.В. Зайцев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — Пермь, 2012. — Т. 11. — № 3. — С. 129-133.
32. Зайцев, А.В. Нормализация микроклимата глубоких рудников в условиях высоких температур горного массива / А.В. Зайцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. — Пермь, 2012. — Выпуск 10 — С. 252-254
33. Зайцев, А.В. Нормализация микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников / А.В. Зайцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов Сборник научных трудов. — Пермь, 2013. — С. 250-252.
34. Казаков, Б.П. Использование систем автоматического управления проветриванием для нормализации микроклиматических параметров атмосферы рудников / Б.П. Казаков, А.В. Зайцев // Горное эхо. — Пермь, 2013. — № 4 (53). — С. 43-46.

35. Казаков, Б.П. Исследование процессов формирования теплового режима глубоких рудников / Б.П. Казаков, А.В. Зайцев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — Пермь, 2014. — Т. 13. — № 10. — С. 91-97.
36. Зайцев, А.В. Исследование процессов теплопереноса в горных выработках при применении систем частичного повторного использования воздуха / А.В. Зайцев, Ю.А. Клюкин, А.С. Киряков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — Пермь, 2014. — Т. 13. — № 11. — С. 121-129.
37. Шалимов, А.В. Разработка способов нормализации микроклиматических условий в глубоких рудниках Норильска / А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Развитие Арктики и приполярных регионов». — Екатеринбург, 2014. — С. 175-178.
38. Зайцев, А.В. Нормирование микроклиматических параметров воздуха в горных выработках и совершенствование способов регулирования теплового режима / А.В. Зайцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. — Пермь, 2014. — С. 261-264.
39. Исаевич, А.Г. Современная вентиляция рудников: экономия без ущерба безопасности / А.Г. Исаевич, А.В. Зайцев, С.В. Мальцев // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. — Пермь, Изд-во ПНИПУ, — 2014. — Т. 1. — № 1. — С. 131-137.
40. Казаков, Б.П. Разработка систем нормализации микроклиматических параметров воздуха в горных выработках глубоких рудников Севера / Б.П. Казаков, А.В. Зайцев, // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России: труды II Всероссийской научно-практической конференции — Якутск: Изд-во ФГБУН институт мерзлотоведения СО РАН, 2014. — С. 262-266.
41. Клюкин, Ю.А. Определение допустимых и безопасных микроклиматических условий в подземных рабочих зонах / Ю.А. Клюкин, А.В. Зайцев // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Горняцкая смена – 2015». — 2015. — С. 79-83.
42. Казаков, Б.П. Повышение эффективности проветривания рудников при применении частичного повторного использования воздуха / Б.П. Казаков, А.В. Зайцев, Е.Л. Гришин, Н.А. Трушкова // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Горняцкая смена – 2015». — 2015. — С. 229-235.

43. Зайцев, А.В. Комплексные исследования в области обеспечения безопасных микроклиматических условий в длинных очистных забоях калийных рудников ОАО «Беларуськалий» / А.В. Зайцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Сборник научных трудов. — Пермь, 2015. — С. 260-263.
44. Зайцев, А.В. Ресурсосберегающие решения в системах кондиционирования рудничного воздуха / А.В. Зайцев, Ю.А. Ключкин // Проблемы недропользования. — Изд-во: Институт горного дела УрО РАН, — 2015. — № 2 (5). — С. 26-31.
45. Трушкова, Н.А. Применение рециркуляционных установок для повышения эффективности проветривания рудников с учетом обеспечения безопасных условий труда / Н.А. Трушкова, Б.П., Казаков, А.В. Зайцев, Е.Л. Гришин // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. — Пермь, Изд-во ПНИПУ, — 2015. — Т. 1. — С. 283-290.
46. Зайцев, А.В. Обеспечение теплового режима рудника в условиях интенсивного окисления горных пород / А.В. Зайцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. — Пермь, 2016. — С. 243-247.
47. Зайцев, А.В. Разработка и внедрение систем кондиционирования воздуха глубоких рудников / А.В. Зайцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. — Пермь, 2017. — С. 268-273.

Сдано в печать «.....» ... 2019 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

ГИ УрО РАН

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а