

**Зайцев Артем Вячеславович**

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ НОРМАЛИЗАЦИИ  
МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ГОРНЫХ  
ВЫРАБОТКАХ ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ**

Специальность 25.00.20.

Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная  
теплофизика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Пермь – 2013

Диссертация подготовлена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Горном институте Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН)

**Научный руководитель:** **Казakov Борис Петрович**  
доктор технических наук, доцент  
заведующий отделом аэрологии и  
теплофизики ГИ УрО РАН (г. Пермь)

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

**Соловьев Дмитрий Егорович**  
кандидат технических наук, научный  
сотрудник лаборатории горной  
теплофизики ИГДС СО РАН (г. Якутск)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки **Горный институт**  
**Кольского научного центра Российской**  
**академии наук** (г. Апатиты)

Защита диссертации состоится «21» июня 2013 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.026.01 при ГИ УрО РАН по адресу г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГИ УрО РАН.

Автореферат разослан «21» мая 2013 года

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а.

Телефон/факс: +7 (342) 216-75-05

E-mail: bba@mi-perm.ru

Ученый секретарь диссертационного  
совета, к.г.-м.н., доцент



Б.А. Бачурин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Современное развитие горных работ, поддержание и увеличение мощности добычи полезных ископаемых часто приводит к необходимости ввода в отработку новых, глубокозалегающих запасов. С увеличением глубины ведения добычных работ возрастает температура горных пород, усиливается влияние техногенных источников тепловыделения на формирование неблагоприятных микроклиматических условий в горных выработках. В результате температура воздуха в подземных рабочих зонах повышается до сверхнормативных значений (согласно п. 115 ПБ 03-553-03 температура воздуха в выработках не должна превышать +26 °С).

Высокая температура воздуха отрицательно влияет на здоровье горнорабочих, приводит к снижению производительности труда, увеличению травмоопасности производства, усложнению технологии добычи.

В прошлом веке ряд шахт и рудников, обрабатывающих глубокие залежи, столкнулись с проблемами регулирования теплового режима и обеспечения требуемых микроклиматических параметров. Имеются опытные данные по шахтам и рудникам СССР (шахты Донецкого угольного бассейна, рудники Норильска, Кривого Рога), стран дальнего зарубежья (рудники Канады, ЮАР, Бразилии, Индии). Исследованиями 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, Ю.В. Шувалов, С.Г. Гендлер, Б.И. Медведев, Г.В. Дуганов, Ю.А. Цейтлин, В.Л. Черняк и другие. Среди зарубежных исследователей широко известны работы исследователей М.Л. McPherson, К.Л. Gibson, С.Л. Bluhm, Л. Mackay. Однако ограниченные возможности вычислительной техники привели к развитию приближенных методов прогноза теплового режима, имеющих ограниченную область применимости и не учитывающих ряда принципиальных теплофизических особенностей глубоких рудников. Выбор средств и способов регулирования теплового режима сводился к использованию балансовых энергетических соотношений без учета взаимодействия различных способов регулирования и расчета их энергоэффективности.

На сегодняшний день рудники ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» вовлекают в отработку глубокие залежи полезных ископаемых (глубина перспективных горных работ до 2 километров). По данным проведенных геологоразведочных работ естественная температура породного массива на таких глубинах достигает +45 °С. Поэтому исследования термодинамических процессов, формирующих микроклимат глубоких рудников, и разработка мероприятий, позволяющих эффективно решать задачу обеспечения требуемых микроклиматических условий в подземных рабочих зонах, являются актуальными.

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

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научных исследований ГИ УрО РАН, проводившихся в период с 2008 по 2012 гг., по темам «Проблемы энергосбережения при нормализации состава и теплофизических параметров атмосферы подземных пространств» (№ гос. регистрации 01.200.106715) и «Моделирование и управление параметрами аэротермодинамических процессов при освоении месторождений минерального сырья» (№ гос. регистрации 01.201.350099), а также с тематикой хоздоговорных работ с ООО «Институт Гипроникель» и предприятиями ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель».

В период 2012-2013 гг. исследования по теме диссертации были поддержаны и частично финансировались за счет поддержки президиума 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», и проект № 12-С-5-1019 «Разработка математических методов моделирования нестационарных аэрологических и теплогазодинамических процессов, протекающих в рудничных вентиляционных сетях в условиях вечной мерзлоты».

**Целью работы** является разработка научно-обоснованных способов нормализации теплового режима в горных выработках различного типа при ведении горных работ в условиях высоких температур породного массива.

**Основная идея работы** заключается в использовании многовариантного численного моделирования термодинамических процессов, протекающих в рудничной атмосфере горных выработок и породных массивах, для разработки комплексных систем нормализации микроклиматических условий.

### **Основные задачи работы:**

1. Исследовать процессы формирования теплового режима в горных выработках глубоких шахт и рудников.
2. Разработать математическую модель нестационарного тепломассопереноса в сети горных выработок произвольной топологии с учетом особенностей формирования теплового режима глубоких рудников.
3. Классифицировать горные выработки рудников по факторам формирования теплового режима для выбора способов и средств регулирования микроклиматических параметров рудничной атмосферы.
4. Исследовать технологические схемы применения подземных воздухоохладителей в горных выработках горизонтов.
5. Разработать способы уменьшения нагрева воздуха в выработках за счет оптимизации геометрических параметров их сечения и применения специальных теплоизоляционных покрытий.

6. Разработать программное и методическое обеспечение построения комплексных систем нормализации микроклиматических условий в горных выработках.

**Методы исследований** предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования распределения микроклиматических параметров воздуха и процессов формирования теплового режима в горных выработках, статистическую обработку результатов экспериментов, математическое моделирование термодинамических процессов в рудничной атмосфере и породных массивах, анализ результатов численных экспериментов.

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

1. Математическая модель нестационарного теплопереноса в сети горных выработок, учитывающая сопряженный теплообмен с породным массивом, гидростатическое сжатие-расширение воздуха и тепловыделения при фазовых переходах влаги, и обеспечивающая построение многофакторных тепловых моделей рудников.
2. Способы управления тепловым режимом, дифференцированные по типам горных выработок в зависимости от факторов формирования тепловых условий, позволяющие обеспечивать требуемые микроклиматические параметры рудничной атмосферы.
3. Комплексные системы нормализации микроклиматических параметров, разработанные на основе многовариантного имитационного моделирования тепловых процессов с оптимальным сочетанием горнотехнических и теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима, соответствующего критерию энергоэффективности.

### **Научная новизна:**

1. Установлены закономерности формирования температурных полей в приконтурной части породного массива и их влияние на распределение температуры воздуха в зависимости от начальной температуры воздуха, температуропроводности горных пород, размеров выработки и скорости движения воздуха.
2. Разработана классификация горных выработок глубоких рудников по основным факторам формирования теплового режима для выбора способов нормализации микроклиматических параметров воздуха.
3. Разработаны способы регулирования теплового режима за счет определения технологических параметров воздухоподающих выработок, обеспечивающих минимальные тепlopоступления при движении воздушной струи в условиях высоких температур породного массива.

4. Разработаны технологические и алгоритмические основы, критерии и программные средства для разработки энергоэффективных комплексных систем нормализации микроклиматических условий в горных выработках рудников с учетом их индивидуальных особенностей.

#### **Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натуральных измерений, соответствием приведенных результатов данным других авторов, большим объемом экспериментальных исследований в шахтных условиях, положительными результатами верификации разработанных математических моделей.

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

Результаты работы позволяют разрабатывать энергоэффективные способы нормализации микроклиматических условий в различных типах горных выработок в условиях высоких температур породного массива.

Результаты исследований использованы для определения мест установки и технических параметров работы шахтных подземных воздухоохладителей в руднике «Таймырский» ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» и разработки комплексных систем нормализации микроклиматических условий в шахтах «Верхняя» и «Глубокая» рудника «Скалистый» ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» в качестве исходных данных по проветриванию и нормализации теплового режима для проектной документации на отработку залежей С-2, С-5, С-5л, С-6 и С-6л Талнахского месторождения сульфидных медно-никелевых руд.

**Апробация работы.** Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях ГИ УрО РАН (Пермь, 2011 – 2013 гг.), на международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2012, 2013 гг.), на международной научно-практической конференции «Аэрология и безопасность горных предприятий» (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2012 г.), на Всероссийском молодежном форуме «Нефтегазовое и горное дело» (Пермь, ПНИПУ, 2011, 2012 гг.), на научно-технических советах рудников ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель», института ООО «Гипроникель», рудников и управления ОАО «Беларуськалий» в 2011, 2012 и 2013 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 научных решений и их практическая реализация, сформулированы основные научные положения и выводы.

## Публикации

По теме диссертационной работы опубликованы 10 печатных работ, в том числе 5 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК.

## Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 30 рисунков и 24 таблицы. Список использованных источников состоит из 164 наименований, в том числе 30 зарубежных.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### I научное положение:

**Математическая модель нестационарного тепломассопереноса в сети горных выработок, учитывающая сопряженный теплообмен с породным массивом, гидростатическое сжатие-расширение воздуха и тепловыделения при фазовых переходах влаги, и обеспечивающая построение многофакторных тепловых моделей рудников.**

Исследование тепловых процессов и разработка способов нормализации микроклимата базируется на создании математических моделей, учитывающих специфические факторы формирования термовлажностных параметров воздуха в горных выработках глубоких рудников. При этом рудничная атмосфера и породный массив являются взаимосвязанными системами, моделирование которых в несопряженной постановке приводит к некорректному расчету теплофизических и аэродинамических полей.

Разработана математическая модель теплопереноса в сети горных выработок, основанная на решении задачи сопряженного теплообмена между воздухом и породным массивом и сетевой задачи воздухо- и теплораспределения с учетом следующих особенностей глубоких рудников:

- влияние гидростатического сжатия-расширения на нагрев-охлаждение воздуха при его движении по наклонным и вертикальным горным выработкам;
- двухслойной структуры окружающего выработку породного массива, представляющей систему «крепь – массив»;
- тепловыделений при фазовых переходах влаги в воздухе.

Математическая постановка задачи нестационарного сопряженного теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом строится на базе дифференциального уравнения энергетического баланса в породном массиве с использованием закона Фурье в виде

$$\frac{dU_m}{dt} = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r} d\sigma \quad (1)$$

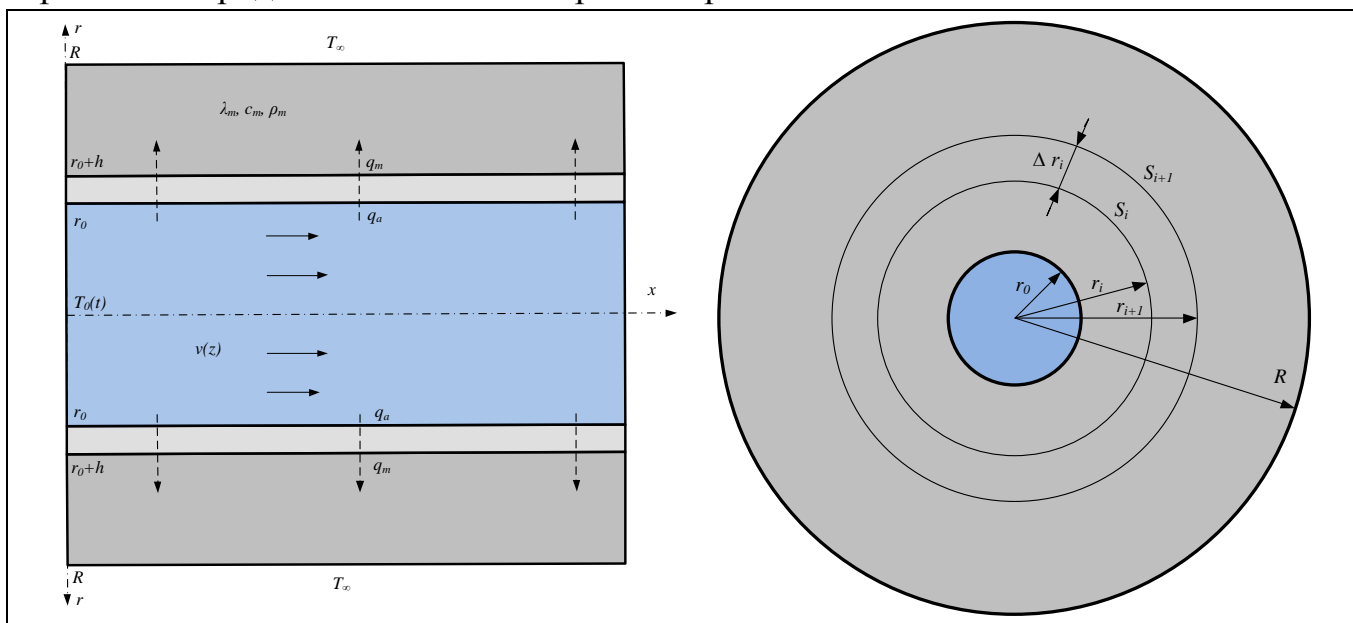
и дифференциального уравнения энергетического баланса в рудничном воздухе в виде

$$\frac{dU_a}{dt} = -\alpha(T - T_a)d\sigma + \frac{mRT}{M\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{dP}{dt} \right) \quad (2),$$

в приведенных выражениях  $U_m$  – внутренняя энергия элемента породного массива (Дж),  $q_m$  – тепловой поток в массиве (Вт/м<sup>2</sup>),  $d\sigma$  – дифференциал поверхности площади теплообмена (м<sup>2</sup>),  $\lambda_m$  – теплопроводность горных пород,  $U_a$  – внутренняя энергия рудничного воздуха (Дж),  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на границе «рудничный воздух – породный массив» (Вт/м<sup>2</sup>),  $T$  – температура породного массива стенки выработки (°С),  $T_a$  – температура воздуха (°С),  $M$  – молярная масса воздуха (кг/моль),  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\rho$  – плотность воздушной среды (кг/м<sup>3</sup>).

Дифференциальные уравнения (1) и (2) при решении дополняются соответствующими граничными и начальными условиями. На внешней границе породного массива, определяемой радиусом теплового влияния, задается естественная температура породного массива (с учетом геотермического градиента региона).

На рисунке 1 приведена расчетная схема задачи теплообмена между воздухом, крепью и породным массивом в горной выработке.



**Рисунок 1. Расчетная схема задачи теплообмена между воздухом, крепью и породным массивом в горной выработке**

Расчетная область представляется цилиндрически симметричной с двумя пространственными координатами – вглубь массива радиальной  $r$  (м) и продольной по длине выработки  $x$  (м). Расчет распределения тепла в породном массиве осуществляется на основе метода конечных объемов. Для этого массив дискретизируется по радиальной и продольной координатам с заданными шагами  $\Delta r$  (м) и  $\Delta x$  (м) соответственно, и по временной координате с шагом  $\Delta t$  (с).



Решение краевой задачи сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

СЛАУ решена с помощью метода LU-разложения, модуль решения задачи нестационарного сопряженного теплообмена реализован программно.

В работе доказано, что учет влияния теплоты фазового перехода «пар – вода» на формирование распределения температур рудничного воздуха эквивалентен введению эффективной скорости движения воздуха в виде

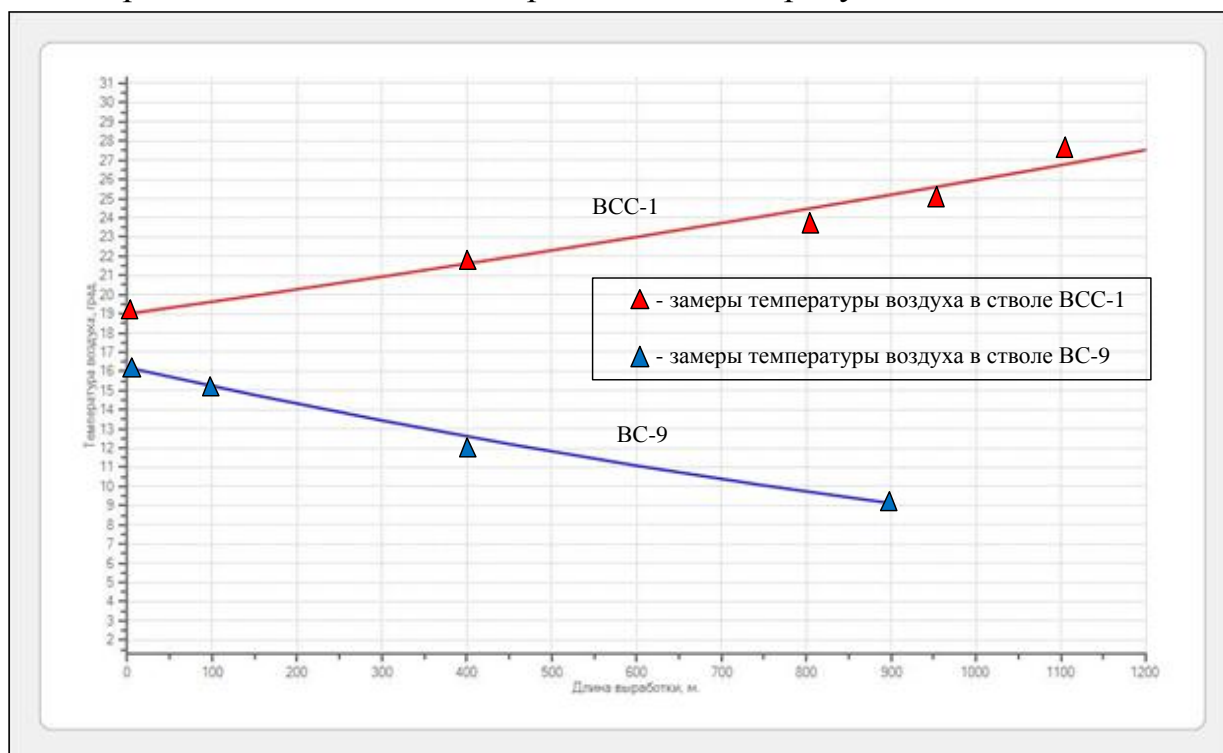
$$\bar{v}(z) = v(z) \left( 1 + \frac{r}{c_v^a} \frac{\partial d}{\partial T} \right),$$

$g$  – ускорение свободного падения ( $\text{м/с}^2$ ),  $r$  – удельное тепловыделение фазового перехода «пар – вода» ( $\text{Дж/кг}$ ),  $d$  – влагосодержание в воздухе ( $\text{кг/кг}$ ).

Для решения задачи теплораспределения во всей вентиляционной сети получено следующее явное по времени численное выражение определения значений температур во всех ветвях сети

$$T_{i+1j}(t) = T_{ij}(t - \Delta t) + \frac{W_T(x_i, t - \Delta t)}{\rho_{ij}(t - \Delta t) \Delta x_{ij} S_j C_v} \Delta t + \frac{\alpha(T_{ij}(t - \Delta t) - T_m)}{\rho_{ij}(t - \Delta t) C_v} \Delta t - \frac{P_{ij}(t) \Delta x_{ij} S_j (\rho_{i+1j}(t) - \rho_{ij}(t - \Delta t))}{\rho_{ij}^2(t - \Delta t) \Delta x_{ij} S_j C_v}$$

Для верификации разработанных математических моделей проведены экспериментальные исследования в условиях глубоких залежей рудников ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель». Результаты измерения температуры воздуха в стволах и расчетные зависимости представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2. Расчетные графики и результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в стволах рудника «Скалистый» ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»**

Характерной особенностью построенных по результатам расчетов графиков, подтверждающихся экспериментальными измерениями, является линейный закон изменения температуры воздуха по глубине стволов, возникающий из-за влияния гидростатического сжатия-расширения воздуха.

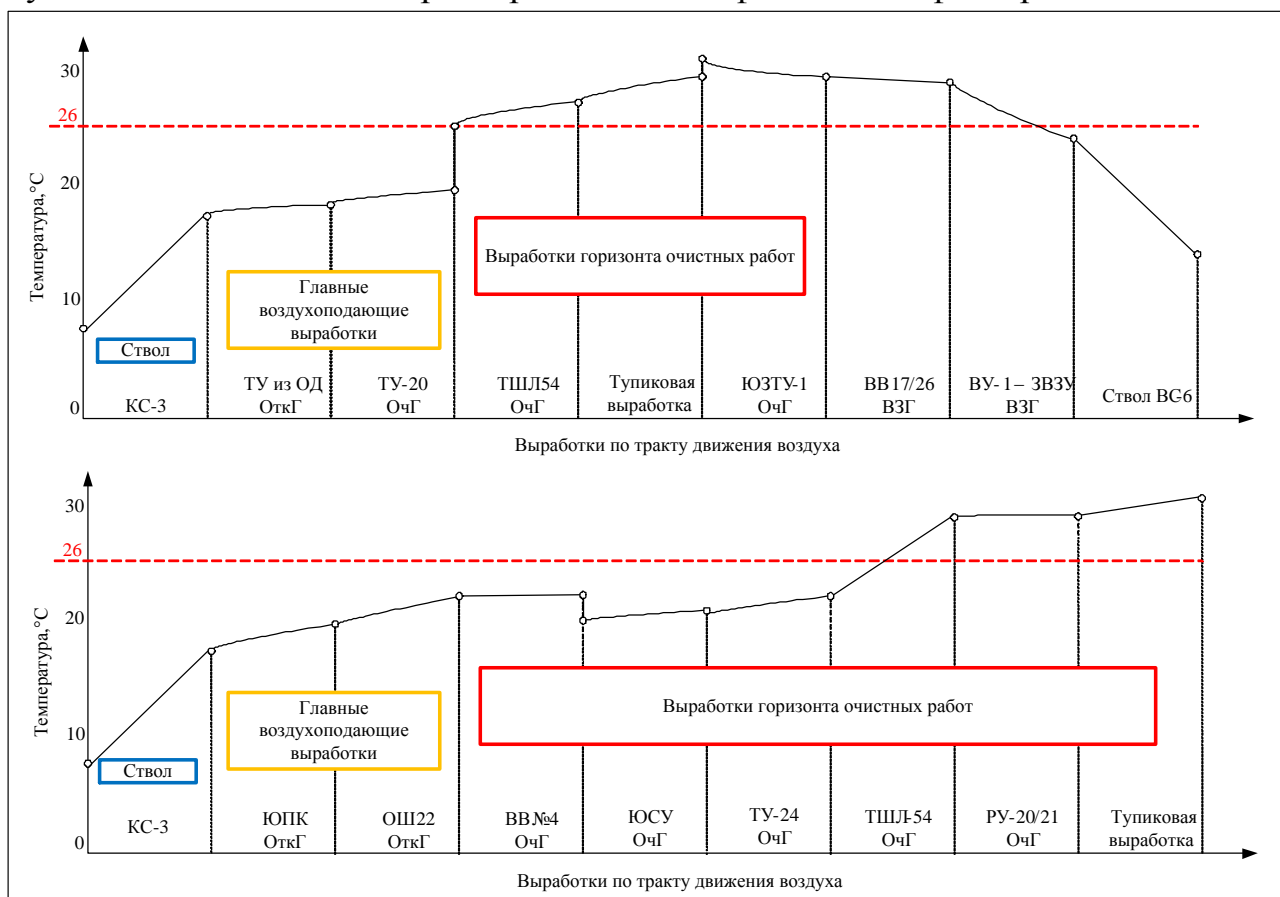
Разработанные математические модели и расчетные алгоритмы позволяют производить прогнозирование микроклиматических параметров рудничного воздуха в горных выработках глубоких рудников.

## II научное положение:

**Способы регулирования теплового режима, дифференцированные по типам горных выработок в зависимости от факторов формирования тепловых условий, позволяющие обеспечивать требуемые микроклиматические параметры рудничной атмосферы.**

Разработка мероприятий по нормализации микроклиматических условий проведена на основе исследования факторов формирования теплового режима в горных выработках различного типа.

Для этого в условиях глубоких горизонтов рудника «Таймырский» (глубина ведения горных работ 1300-1400 метров) проведены экспериментальные исследования распределения температуры по тракту движения воздушных потоков, отдельные результаты которых приведены на рисунке 3. Установлено, что в выработках различного типа отличается характер нагрева воздушной струи, обусловленный действием разнородных теплофизических факторов.



**Рисунок 3. Термограммы по тракту движения воздушной струи (шахта №3 рудника «Таймырский» ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»)**

Анализ проведенных экспериментальных наблюдений позволил выделить следующие основные факторы (процессы) формирования микроклиматических условий в горных выработках:

- гидростатическое сжатие и расширение воздуха;
- теплообмен между рудничным воздухом и породным массивом;
- влагообменные процессы в горных выработках;
- техногенные источники выделения тепла (горные машины и закладочные массивы).

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований обобщены в виде классификации выработок глубоких рудников по характерным факторам формирования теплового режима, в которой выделяется четыре группы выработок (в скобках представлены основные аэродинамические и теплофизические особенности выработок каждой группы):

1. Воздухоподающие и вентиляционные стволы (вертикальное пространственное расположение, высокая скорость движения воздуха, относительно малая поверхность контакта воздуха с породным массивом).
2. Главные воздухоподающие и вентиляционные выработки (горизонтальное и наклонное пространственное расположение, высокая скорость движения воздуха, относительно малая поверхность контакта воздуха с породным массивом).
3. Подготовительные выработки в пределах очистных и вентиляционно-закладочных горизонтов, имеющие сквозное проветривание (низкая скорость движения воздуха из-за распараллеливания общего расхода, значительная поверхность контакта воздуха с породным массивом, наличие большого числа техногенных источников тепловыделения).
4. Тупиковые забои (низкая скорость движения воздуха, значительная поверхность контакта воздуха с породным/закладочным массивом, действие техногенных источников тепловыделения).

Разработанная классификация является основой разработки и выбора способов нормализации микроклиматических параметров рудничной атмосферы в выработках различного типа. С ее помощью осуществлено дифференцированное рассмотрение способов нормализации микроклиматических условий, а именно:

- формирование микроклиматических параметров воздуха в воздухоподающих стволах и в пределах околоствольных дворов;
- уменьшение нагрева воздуха при его движении по главным воздухоподающим выработкам горизонтов;
- использование подземных воздухоохладителей для нормализации температуры воздуха в выработках горизонтов очистных работ.

Основным фактором, определяющим формирование температурного поля воздуха в стволах, является процесс гидростатического сжатия, исключить физическое влияние которого невозможно.

Выражение, определяющее скорость возрастания температуры воздуха с глубиной при его движении по стволам, имеет следующий вид

$$\frac{dT}{dz} = \frac{g}{\left(c + \frac{R}{M} - r \frac{\partial d}{\partial T}\right)}$$

Решение задачи снижения температуры воздуха, поступающего по стволам на проветривание горизонтов глубоких рудников, заключается в обеспечении минимально возможной температуры воздуха, подаваемого в ствол за счет использования системы охлаждения воздуха на поверхности. В то же время существующими ПБ 03-553-03 накладывается ограничение на минимальную температуру воздуха, поступающего в горные выработки, значением +2 °С. Установлено, что эффективность системы охлаждения воздуха на поверхности, для подачи в выработки околоствольных дворов воздуха требуемой температуры ограничена глубинами 2000-2500 метров.

Для минимизации нагрева воздуха при его движении по подземной сети горных выработок разработаны способы управления процессами теплопередачи между породным массивом и воздухом за счет выбора оптимального сочетания размеров поперечного сечения выработок и скорости движения воздуха.

Для этого было проведено моделирование ряда вариантов, отличающихся скоростью движения воздуха и площадью поперечного сечения горной выработки. Результаты представлены на рисунке 4.

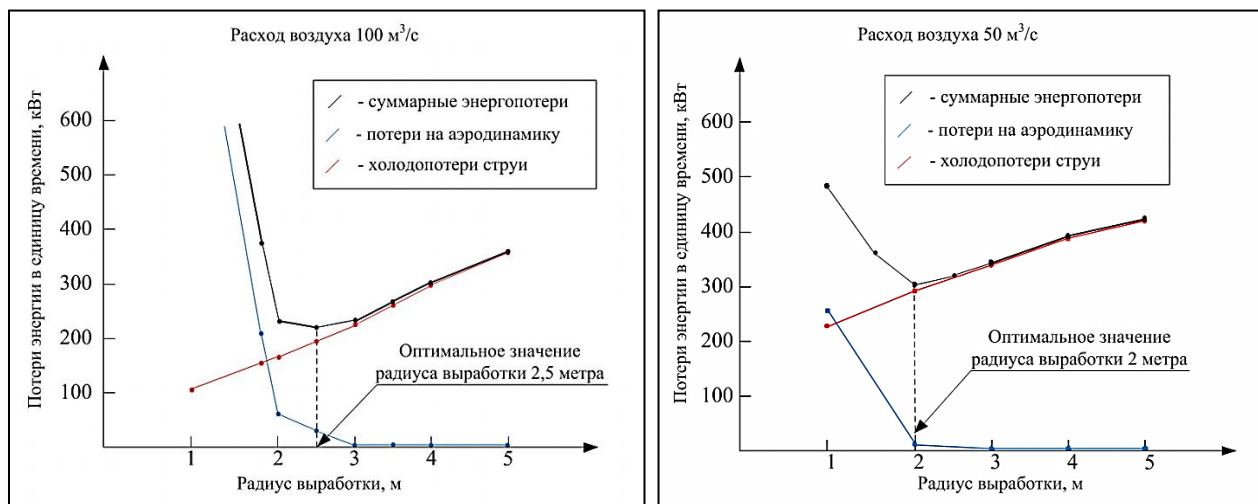
В работе доказано существование оптимального сочетания радиуса воздухоподающих выработок и расходов воздуха в них, обеспечивающего минимальные суммарные затраты на поддержание расхода и тепловые потери в окружающий породный массив. Установлено, что с возрастанием расхода воздуха увеличивается значение оптимального радиуса выработки. В общем случае оптимальные параметры выработки определяются индивидуально с учетом расхода воздуха, подаваемого по выработке, и теплофизических свойств массива. Задача поиска оптимального радиуса заключается в минимизации следующего функционала, равный сумме тепловых  $E_R$  и аэродинамических  $E_Q$  потерь

$$E_R + E_Q \rightarrow \min$$

$$\rho_a \cdot c_a \cdot Q \cdot \Delta T(r, t) + 9,81 \cdot R(r) \cdot Q^3 \rightarrow \min,$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха,  $c_a$  – теплоемкость воздуха,  $Q$  – расход воздуха в выработке,  $\Delta T$  – разница температур воздуха в начале и в конце выработки,  $R$  – аэродинамическое сопротивление горной выработки.

Результатирующая разница температур воздуха  $\Delta T(r, t)$  и аэродинамическое сопротивление  $R(r)$  являются функциями, зависящими от радиуса выработки и формы поперечного сечения. Оптимизируемым параметром является радиус выработки. Его оптимальным значением является такое, при котором обеспечивается минимум представленного функционала.



**Рисунок 4. Решение задачи оптимизации радиуса горной выработки**

Для исследования и разработки схем размещения воздухоохладителей в подземных условиях глубоких рудников разработана тепловая модель типового очистного горизонта, которая позволила произвести моделирование воздухо- и теплораспределения в сети горных выработок, произвести прогноз теплового режима при различных схемах размещения воздухоохладителей. Промоделированы варианты использования воздухоохладителей для разных температур породного массива. Анализ показал, что эффективность охлаждения воздуха в значительной степени зависит от выбора места размещения воздухоохладителей, их мощности, температуры стенок породного массива и топологии сети выработок горизонта. Поэтому выбор параметров размещения и работы средств подземных систем кондиционирования должен осуществляться индивидуально.

Полученные результаты обобщены в таблице 2, в которой представлены разработанные и исследованные способы, классифицированные по эффективности в выработках различного типа.

**Таблица 2. Способы регулирования теплового режима, дифференцированные по типам горных выработок**

Способ	Охлаждение воздуха на поверхности	Использование теплоизоляционных покрытий и крепей	Оптимизация геометрических параметров	Использование подземных воздухоохладителей
<b>Тип способа</b>	Теплотехнический	Горнотехнический	Горнотехнический	Теплотехнический
<b>Воздухоподающие Вентиляционные стволы</b>	•	•		
<b>Выработки околоствольных дворов и КСН</b>	•	•		•
<b>Главные воздухоподающие-вентиляционные выработки</b>	•	•	•	•
<b>Подготовительные выработки</b>			•	•
<b>Тупиковые забои</b>				•

Полученные результаты исследований термодинамических процессов и разработки способов регулирования теплового режима позволяют производить локальную нормализацию микроклиматических параметров воздуха и являются основой создания эффективных комплексных систем нормализации микроклиматических условий, обеспечивающих минимальные энергетические затраты.

### **III научное положение:**

**Комплексные системы нормализации микроклиматических параметров, разработанные на основе многовариантного имитационного моделирования тепловых процессов с оптимальным сочетанием горнотехнических и теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима, соответствующего критерию энергоэффективности.**

Практически и энергетически эффективная нормализация микроклиматических условий в горных выработках, из-за сложной топологии сети выработок и многообразия причин формирования микроклиматических условий, может быть обеспечена только сочетанием технических мероприятий, составляющих комплексные системы нормализации микроклиматических условий.

Основными требованиями, предъявляемыми к их разработке, являются:

- эффективность обеспечения допустимых микроклиматических параметров рудничной атмосферы в горных выработках;
- надежность функционирования;
- оптимальное сочетание капитальных и эксплуатационных затрат.

Определение эффективности разрабатываемых технических мероприятий регулирования теплового режима в первую очередь должно осуществляться в соответствии с требованием существующих ПБ 03-553-03, предъявляемых к температуре и скорости движения воздуха, то есть рассчитанные и принятые значения должны удовлетворять следующим неравенствам

$$+ 2 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq +26 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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

Второй критерий, обеспечивающий минимальные затраты энергии при эксплуатации системы нормализации микроклиматических условий, имеет вид

$$\sum \rho_a \cdot c_a \cdot Q \cdot \Delta T(r, t) + 9,81 \cdot R(r) \cdot Q^3 + E_K \rightarrow \min$$

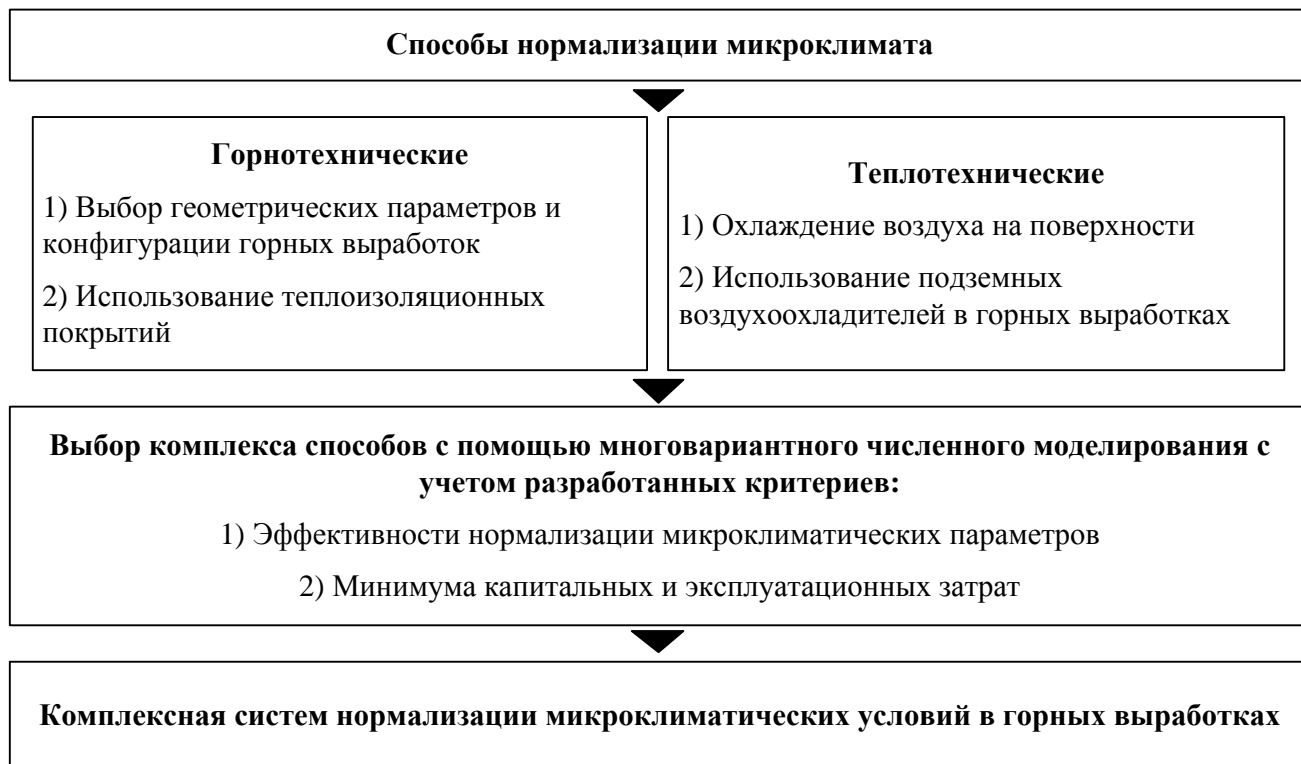
где  $E_K$  – холодопроизводительность систем охлаждения воздуха (кВт).

В соответствии с указанными требованиями и критериями к системе в работе предложен подход к разработке систем нормализации микроклиматических параметров в виде поэтапного алгоритма, основными моментами которого являются:

- первоначальная проработка горнотехнических мероприятий как менее энергоемких и позволяющих при необходимости формировать наиболее благоприятные условия для использования теплотехнических мероприятий;

- использование разработанных инструментов моделирования тепловых процессов с учетом индивидуальных особенностей рудника, залежи, горизонта.

Схема разработки комплексных систем нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников, отражающая идею предлагаемого алгоритма, представлена на рисунке 5.



**Рисунок 5. Схема разработки комплексных систем нормализации микроклиматических условий**

Для автоматизированного решения задачи выбора способов нормализации и определения технических мероприятий при создании комплексных систем на основе численного моделирования теплового режима разработана методика построения тепловых моделей рудников на основании экспериментальных данных воздушно-депресссионных и температурно-влажностных съемок или проектных параметров ведения горных работ.

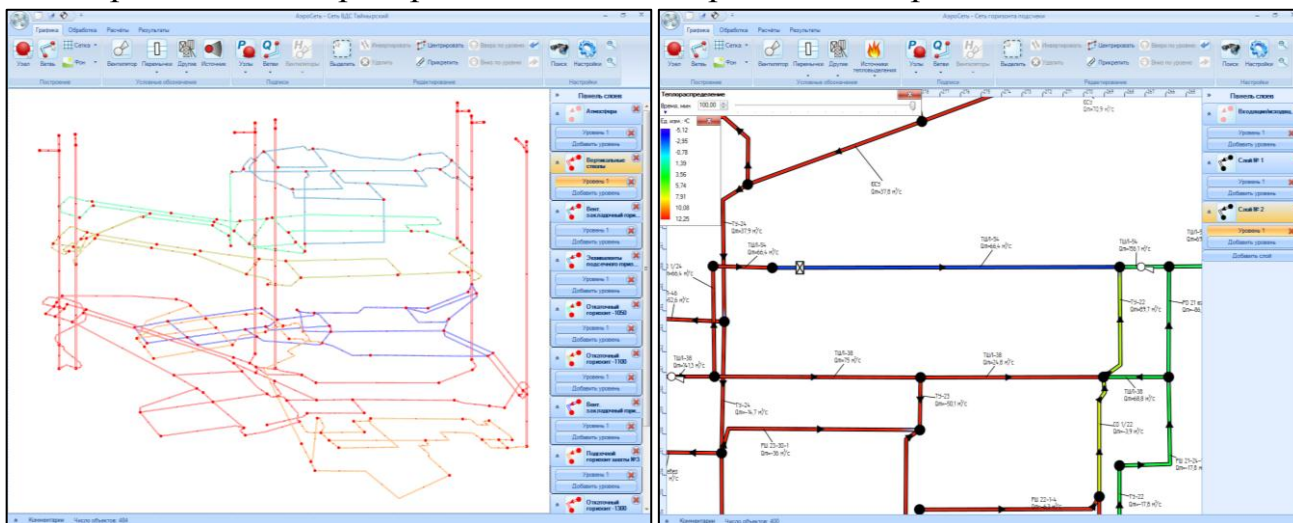
Для автоматизированной разработки тепловых моделей и проведения моделирования теплового режима разработан модуль теплогазодинамического расчета программно-вычислительного комплекса (ПВК) «АэроСеть», в который интегрированы разработанные математические модели.

Модуль теплогазодинамического расчета обладает удобным графическим интерфейсом, позволяет производить расчет сопряженной задачи распределения аэродинамических и термодинамических параметров рудничного воздуха и породного массива в сетевой постановке с учетом задания в вентиляционной сети местных источников выделения тепла, вентиляторов и технических средств систем кондиционирования воздуха.

Полученная и реализованная в ПВК «АэроСеть» на базе программного модуля ТГД-расчета фундаментальная расчетная база позволяет решать задачи

прогнозирования и нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников.

На рисунке 6 представлены рабочие окна ПК «АэроСеть» для построения тепловой и вентиляционной модели рудника и представления результатов моделирования теплораспределения в сети при помощи градиентной заливки



**Рисунок 6. Рабочие окна ПК «АэроСеть» для построения тепловой и вентиляционной модели рудника и представления результатов моделирования теплораспределения в сети горных выработок при помощи градиентной заливки**

Разработанный алгоритм, средства и способы апробированы для построения комплексных систем нормализации микроклиматических условий в горных выработках рудника «Скалистый» ОАО «ГМК «Норильский никель» при отработке глубоких залежей С-2, С-5, С-5л, С-6 и С-6л медно-никелевых сульфидных руд (глубина залегания до 2000 метров, температура горных пород до +50 °С).

В таблице 3 представлены варианты комплексных систем нормализации микроклиматических условий для условий рудника «Скалистый», отличающихся различными сочетаниями горнотехнических и теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима.

Одинаковую эффективность различных комплексных систем нормализации микроклиматических параметров удастся обеспечить при различных холодопроизводительностях технических средств, местах их размещения.

**Таблица 3. Варианты комплексных систем нормализации микроклимата рудника «Скалистый» с оценкой их эффективности и требуемой холодопроизводительности**

Комплекс способов регулирования теплового режима	Оценка эффективности	Производительность системы на поверхности
		Производительность подземной системы
Поверхностное охлаждение воздуха, оптимизация параметров выработок	Не эффективно в выработках горизонтов очистных работ	6200 кВт
		—
Подземное охлаждение воздуха в выработках ОД, оптимизация параметров выработок	Не эффективно в стволах	14500 кВт
		—



<b>Комплекс способов регулирования теплового режима</b>	<b>Оценка эффективности</b>	<b>Производительность системы на поверхности</b>
		<b>Производительность подземной системы</b>
Поверхностное охлаждение воздуха и воздухоохладители в главных выработках горизонтов, оптимизация параметров выработок	Эффективно во всех выработках горизонтов	6200 кВт
		4900 кВт
<b>Поверхностное охлаждение воздуха и воздухоохладители в панельных выработках горизонтов, оптимизация параметров выработок</b>	<b>Эффективно во всех выработках горизонтов</b>	<b>6200 кВт</b>
		<b>2300 кВт</b>

Таким образом, эффективное обеспечение требуемых микроклиматических условий в рабочих зонах рудника «Скалистый» при отработке глубоких залежей с минимальными энергетическими затратами осуществляется использованием системы охлаждения воздуха на поверхности холодопроизводительностью 6200 кВт и системой подземных воздухоохладителей суммарной мощностью 2300 кВт. Подземные воздухоохладители располагаются в панельных выработках очистных горизонтов, что обеспечивает минимальные тепlopоступления в воздушную струю при ее движении до рабочих зон.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе содержится решение научно-практической задачи разработки научно-обоснованных способов нормализации теплового режима в горных выработках различного типа при ведении горных работ в условиях высоких температур породного массива и получены следующие основные научные результаты:

1. Проведены экспериментальные исследования распределения микроклиматических параметров воздуха, термодинамических процессов и факторов формирования теплового режима в горных выработках различного типа и рабочих зонах в условиях глубоких залежей рудников «Скалистый», «Октябрьский» и «Таймырский» ОАО «ГМК «Норильский никель».
2. Разработана математическая модель нестационарного тепломассопереноса в сети горных выработок с учетом сопряженного теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом, гидростатического сжатия-расширения воздуха и тепловыделений при фазовых переходах влаги. Модель верифицирована при помощи специально подготовленных и проведенных экспериментальных исследований.
3. По результатам анализа экспериментальных данных и теоретических исследований разработана классификация горных выработок глубоких рудников по основным факторам формирования теплового режима, которая позволяет осуществлять выбор технических средств и решений

нормализации микроклиматических параметров рудничной атмосферы в горных выработках различного типа.

4. Исследована и обоснована область применения способа охлаждения воздуха на поверхности для нормализации микроклиматических условий в стволах, околоствольных дворах и главных воздухоподающих выработках.
5. Разработаны способы регулирования теплового режима, обеспечивающие минимальные теплопотупления при движении воздушной струи по главным воздухоподающим горным выработкам в условиях высоких температур породного массива, за счет оптимизации скорости движения воздуха и поперечных размеров горных выработок, выбора параметров теплоизоляции их стенок.
6. Исследованы технологические схемы использования подземных воздухоохладителей для нормализации микроклиматических условий в горных выработках горизонтов очистных работ.
7. Разработаны методическое обеспечение, критерии и программные средства для разработки энергоэффективных комплексных систем нормализации микроклиматических условий в горных выработках рудников с учетом их индивидуальных особенностей на основе использования метода вариантов и численного моделирования теплового режима на тепловых моделях рудников.
8. Проведено построение комплексных систем нормализации микроклиматических условий в подземных рабочих зонах рудника «Скалистый» ОАО «ГМК «Норильский никель» для проектной документации на отработку глубоких залежей С-2, С-5, С-5л, С-6 и С-6л Талнахского месторождения медно-никелевых сульфидных руд.

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

***а) публикации в изданиях, утвержденных ВАК Минобрнауки РФ***

1. Круглов Ю.В. Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников / Ю.В. Круглов, Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск, 2011, № 5 – С. 100-108.
2. Казаков Б.П. Оптимизация теплогазодинамических расчетов топологически сложных вентиляционных сетей / Б.П. Казаков, А.В. Зайцев, Е.Л. Гришин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – МГГУ, 2011, №4. – С. 191-194.
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. – МГГУ, 2011, №4. – С. 213-222.
4. Зайцев А.В. Нестационарный сопряженный теплообмен между рудничным воздухом и горным массивом в условиях глубоких рудников / А.В. Зайцев, Б.П. Казаков, А.В. Шалимов // Известия вузов. Горный журнал. – Екатеринбург, 2013, №1. – С. 26-32.
5. Карелин В.Н. Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников / В.Н. Карелин, А.В. Кравченко, Л.Ю. Левин, Б.П. Казаков, А.В. Зайцев // Горный журнал. – Москва, 2013, №6. – С. 65-68.

***б) публикации в других изданиях***

6. 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, том 5, №2. – С. 133-135.
7. 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, том 5, №2. – С. 156-158.
8. Зайцев А.В. Нормализация микроклимата глубоких рудников в условиях высоких температур горного массива / А.В. Зайцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов. № 10. – Пермь, 2012. – С. 252-254.
9. Казаков Б.П. Влияние закладочных работ на формирование теплового режима в горных выработках в условиях рудников ОАО «Норильский никель» / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, Пермь, ПНИПУ, 2012, №2. – С. 110-114.
10. Зайцев А.В. Нормализация микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников / А.В. Зайцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов. № 11. – Пермь, 2013. – С. 250-252.

---

Сдано в печать 20 мая 2013 г.  
Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ  
ГИ УрО РАН  
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а