

Ольховский Дмитрий Владимирович

**НОРМАЛИЗАЦИЯ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТУПИКОВЫХ
ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ**

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Научный руководитель: **Зайцев Артем Вячеславович**
доктор технических наук,
заведующий лабораторией развития горного производства
«ГИ УрО РАН» (г. Пермь)

Официальные оппоненты: **Лугин Иван Владимирович**
доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник лаборатории рудничной
аэродинамики Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института горного дела им. Н. А.
Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук
(г. Новосибирск)

Каймонов Михаил Васильевич
кандидат технических наук, доцент
старший научный сотрудник лаборатории горной
теплофизики Института горного дела Севера им. Н. В.
Черского Сибирского отделения Российской академии наук
(г. Якутск)

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»**
(г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится «18» октября 2024 года в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «ГИ УрО РАН» и на сайте <https://permisc.ru>.

Автореферат разослан « » 2024 года

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

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

Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02

E-mail: lserg@mi-perm.ru

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук



Лобанов С. Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Увеличение глубины ведения работ неминуемо ведет к росту температуры воздуха в рабочих зонах. Наиболее высокие температуры фиксируются в тупиковых горных выработках по причине повышенной температуры поверхности окружающего породного массива, нагрева воздуха от вентилятора и сравнительно малого объема воздуха, подаваемого на проветривание. Данные выработки представляют особую сложность в управлении микроклиматическими параметрами. Повышенные температуры в рабочих зонах приводят к снижению производительности труда и поломкам техники из-за её перегрева. С подобными проблемами сталкиваются такие горнодобывающие компании как ООО «Еврохим-ВолгаКалий» и ПАО «ГМК «Норильский никель». Это приводит предприятия к необходимости решения проблемы обеспечения требуемых микроклиматических условий в рабочих зонах тупиковых выработок.

Вопросам нормализации микроклиматических параметров и их прогнозированию в тупиковых выработках посвящено множество работ. Вопросам нормализации микроклимата в тупиковых выработках посвящены работы Клебанова Ф. С., Костина В. А., Щербаня А. Н., Кремнева О. А., Воропаева А. Ф., Алабьева В. Р., Новикова В. В., Пашияна Л. А., Бажина Т. П., Зимица Л. Б., Мартынова А. А., Малеева Н. В., Яковенко А. К., Смирнова Ю. М. Данные работы опираются на различные методы прогнозирования теплораспределения в тупиковых выработках. Аналитическими методами прогнозирования теплораспределения занимались такие учёные как Ягельский А. Н., Воропаев А. Ф., Величко А. Е., Щербань А. Н., Черныка В. П., Брайчева Н. А., Малашенко Э. Н., Зимин Л. Б., Гендлер С. Г., Галкин А. Ф., Смирнов Ю. М. Данные методы на сегодня имеют ограниченную область применения и недостаточную точность. В связи с ростом мощности современной вычислительной техники стали появляться методы численного расчета сопряженного нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом, таким способам решения посвящены работы Jordan D. W., Черныка В. П., Хохолова Ю. А., Соловьева Д. Е., Зайцева А. В., и Левина Л. Ю. Применение численных методов позволяет существенно увеличить точность прогнозирования, однако в ходе экспериментальных исследований было установлено, что перечисленные методы прогнозирования теплового режима не учитывают важного для тупиковых выработок процесса теплообмена. Так, при анализе результатов экспериментального обследования подземной системы кондиционирования воздуха в тупиковой выработке Гремячинского ГОК ООО «Еврохим-ВолгаКалий» было установлено, что на нагрев воздуха в вентиляционном трубопроводе существенное влияние оказывает лучистый теплообмен между поверхностями выработки и вентиляционного трубопровода, доля которого может достигать до 77%, что не учитывается в существующих тепловых моделях тупиковых выработок. Несовершенство существующих методов прогнозирования приводит к невозможности правильной оценки влияния различных способов нормализации микроклиматических условий и расчета систем кондиционирования шахтного воздуха для тупиковых выработок, в связи с чем необходимо их дальнейшее совершенствование.

Цель работы – обоснование методики подбора местных систем управления тепловым режимом тупиковых горных выработках в условиях высокой температуры окружающего породного массива.

Основная идея – управление тепловым режимом тупиковых выработок на основе результатов исследования и разработки способов регулирования микроклиматических параметров с учетом лучистого теплообмена, движения забоя и нагрева от вентиляторов местного проветривания.

Основные задачи работы

1. Экспериментально исследовать распределение температур воздуха в тупиковых горных выработках глубоких рудников.
2. Разработать математическую модель сопряженного нестационарного теплообмена в системе «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода – воздух в вентиляционном трубопроводе», учитывающую движение забоя выработки, тепловыделения от техногенных источников и лучистый теплообмен. Верифицировать модель на основе экспериментальных данных.
3. Оценить эффективность горно- и теплотехнических способов управления микроклиматом в призабойной части выработки на основе разработанной математической модели теплообмена тупиковой горной выработки.
4. Оценить влияние лучистого теплообмена на нагрев воздуха в вентиляционном трубопроводе при различных материалах стенки.
5. Разработать методику подбора местных систем управления тепловым режимом тупиковых выработок для глубоких рудников, позволяющую регулировать микроклиматические условия.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования процесса формирования микроклиматических параметров в тупиковых горных выработках, математическое моделирование распределения микроклиматических параметров, анализ результатов численных экспериментов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель теплообмена в системе «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода – воздух в вентиляционном трубопроводе», учитывающая лучистый теплообмен, движение забоя выработки и нагрев от вентиляционного оборудования, позволяет рассчитывать микроклиматические параметры в тупиковой выработке.
2. Способ снижения нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе при нагнетательном способе проветривания с помощью увеличения термического сопротивления стенки и снижения излучательной способности внешней поверхности трубопровода позволяет управлять микроклиматом в призабойном пространстве тупиковой горной выработки.
3. Методика разработки систем управления тепловым режимом тупиковых горных выработок, включающая алгоритм выбора способов регулирования микроклиматических параметров на основе многовариантного численного моделирования теплораспределения воздуха, позволяет обосновывать технические решения для обеспечения требуемой температуры воздуха в рудничной атмосфере.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов численных решений и натурных измерений, соответствием приведенных результатов данным других авторов, экспериментальными исследованиями в натуральных условиях, положительными результатами реализации предложенных технических решений на рудниках.

Научная новизна

1. Разработана сопряженная математическая модель нестационарного теплообмена в системе «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода – воздух в вентиляционном трубопроводе», учитывающая лучистый теплообмен, движение забоя выработки и нагрев воздуха от вентиляторов местного проветривания.
2. Предложены способы снижения нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе путем снижения приведенной степени черноты для нормализации микроклимата в тупиковой горной выработке.
3. Определен критерий эффективности для оценки эффективности различных способов нормализации микроклиматических параметров в забое по уровню снижению температуры подаваемого воздуха.
4. Разработана методика подбора местных систем управления тепловым режимом для глубоких рудников на основе математической модели теплообмена, учитывающей лучистый теплообмен, включающая предложенные способы снижения нагрева воздуха в трубопроводе, позволяющая управлять микроклиматическими условиями в призабойном пространстве протяженных тупиковых выработок при помощи комбинированного применения горно- и теплотехнических способов.

Практическое значение и реализация результатов работы

Результаты, полученные в диссертационной работе, позволяют разрабатывать технические решения обеспечивающие требуемые параметры микроклимата в тупиковой горной выработке.

На сегодня результаты исследований успешно применяются на горнодобывающих предприятиях, часть из них находится в процессе внедрения.

Разработанная математическая модель позволила проанализировать существующий проект местной системы кондиционирования, разработать и применить компенсирующие мероприятия, скорректировать проектные решения и обеспечить требуемые микроклиматические параметры в рабочей зоне на Гремячинском ГОКе ООО «Еврохим-ВолгаКалий».

Предложенные горнотехнические способы снижения нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе применены совместно с теплотехническими и позволили существенно улучшить микроклиматические условия при проходке в выработках РВ-1 и РВ-2 шахты «Глубокая» рудника «Скалистый» горного предприятия ОАО «ГМК «Норильский никель».

Математическая модель и методика разработки систем управления тепловым режимом тупиковых горных выработок использованы при разработке основных технических решений по вентиляции и тепловому режиму и при подготовке проектной документации шахты «Глубокая».

Связь работы с крупными научными программами и темами

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Апробация работы

Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях ГИ УрО РАН (Пермь, 2023-2024 гг.), зимних школах по механике сплошных сред ИМСС (Пермь, 2021 и 2023 гг.), 30-ом международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2022 г.), всероссийской научной конференции (с международным участием) «Промышленная безопасность и охрана труда» (Санкт-Петербург, Горный университет 2023 г.), на научно-технических советах рудников ЗФ ПАО «ГМК

«Норильский никель», руднике Гремячинского ГОК и управлении ООО «ЕвроХим» в 2019-2023 годах.

Личный вклад автора

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

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д-ру техн. наук Зайцеву А. В. за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, д-ру техн. наук Левину Л. Ю. за создание уникальной рабочей среды, д-ру техн. наук Семину М. А. и канд. техн. наук Паршакову О. С. за ценные указания, Бублику С. А. за помощь в разработке и программной реализации алгоритмов..

Успешной работе над диссертацией способствовала творческая и доброжелательная атмосфера в коллективе, поддержка и понимание членов семьи.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликованы 7 печатных работ, в том числе 1 статья, входящая в первый квартиль Scopus, опубликована в международном журнале International Journal of Thermal Sciences и 6 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 18 таблиц. Список использованных источников состоит из 119 наименований, в том числе 36 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I научное положение:

Математическая модель теплообмена в системе «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода – воздух в вентиляционном трубопроводе», учитывающая лучистый теплообмен, движение забоя выработки и нагрев от вентиляционного оборудования, позволяет рассчитывать микроклиматические параметры в тупиковой выработке.

Основной проблемой при расчете холодопроизводительности воздухоохладителей тупиковых выработок, является низкая точность определения требуемой температуры воздуха после воздухоохладителя. Это связано с тем, что для этого применяются методики, которые опираются на полуэмпирический коэффициент нестационарного теплообмена, что приводит к снижению точности расчётов и как следствие неверному определению требуемой холодопроизводительности. Кроме того, при расчетах не учитывается лучистый теплообмен между вентиляционным трубопроводом и поверхностью стенок выработки. Влияние данного вида теплообмена становится особенно заметно при применении местных систем кондиционирования воздуха (СКВ), которые подают охлажденный воздух по вентиляционному трубопроводу в забой охлаждаемой выработки. Это подтверждают результаты экспериментального исследования интенсивности нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе, проведенного при испытании СКВ тупиковой выработки калийного рудника (см. рисунок 1).

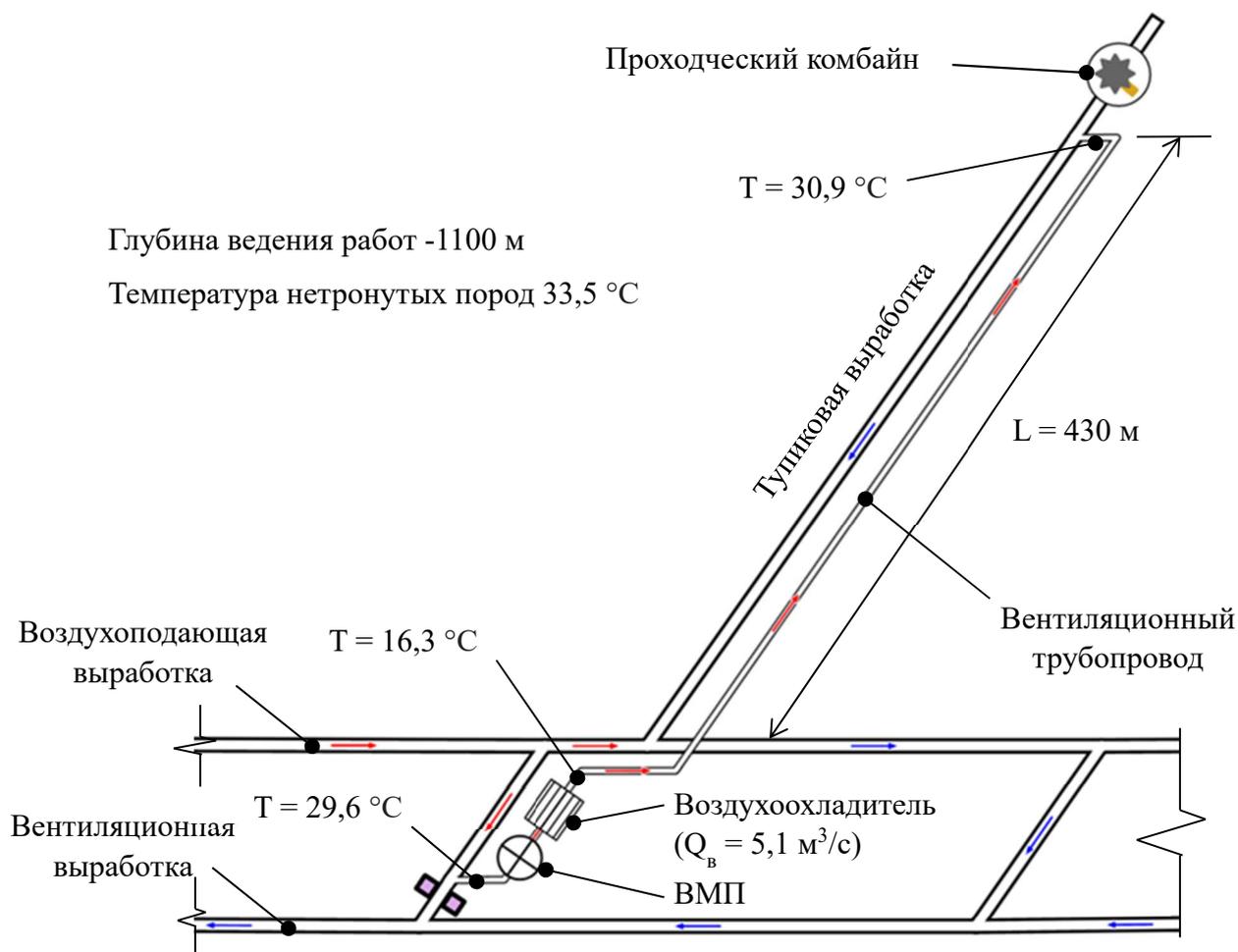


Рисунок 1 — Принципиальная схема проветривания тупиковой выработки с системой кондиционирования воздуха

Полученные результаты экспериментальных измерений температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода были сопоставлены с результатами стационарной модели конвективного теплообмена (см. рисунок 2).

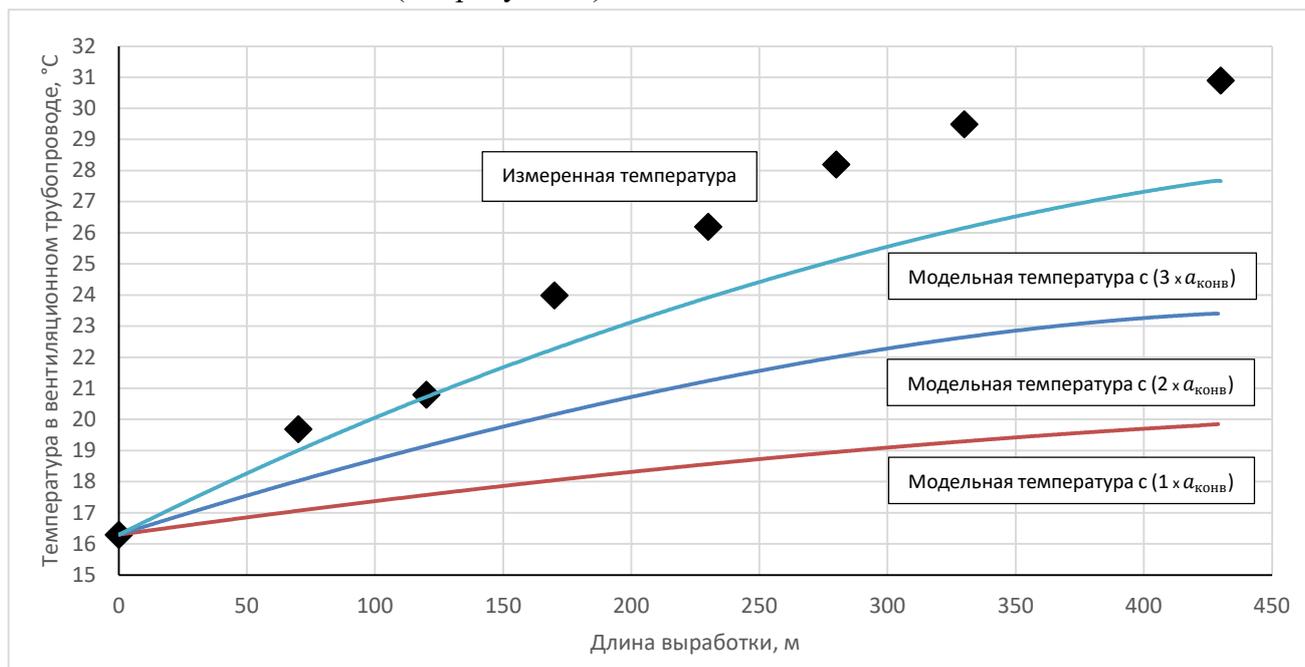


Рисунок 2 — График температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода

В результате было установлено, что фактическая интенсивность нагрева воздуха внутри вентиляционного трубопровода существенно выше, чем показывают результаты моделирования конвективного теплообмена в тупиковой выработке, даже при увеличении коэффициентов теплоотдачи вентиляционного трубопровода в 3 раза по сравнению со значением, определяемым для гладких труб. Дальнейшее увеличение коэффициентов теплоотдачи считается не физическим и не может объяснить столь сильную интенсивность нагрева воздуха в трубопроводе. В результате было выдвинуто предположение о том, что существенное влияние оказывает лучистый теплообмен между вентиляционным трубопроводом и стенками выработки.

Учет теплового потока между вентиляционным трубопроводом и стенками выработки определялся по формуле:

$$w = \varepsilon_{\Pi} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \quad (1)$$

где ε_{Π} – приведенная степень черноты; $C_0 = 5,67$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_1 и T_2 - температура поверхности выработки и вентиляционного трубопровода, °C; F – площадь трубопровода, м².

Для оценки степени влияния лучистого теплообмена было проведено моделирование и построен график температур (см. рисунок 3). Для этого были заданы степени черноты для поверхности трубопровода ($\varepsilon = 0,945$ для резины) и выработки ($\varepsilon = 0,96$ для сильвинита).

Учет лучистого теплообмена позволил получить модельную интенсивность нагрева воздуха в трубопроводе близкую к наблюдаемой. При этом лучистый теплообмен обеспечил около 66 % нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе, в то время как на конвективный теплообмен пришлось лишь 34 %. Таким образом, был сделан вывод о необходимости учета лучистого теплообмена при моделировании теплораспределения в тупиковых горных выработках.

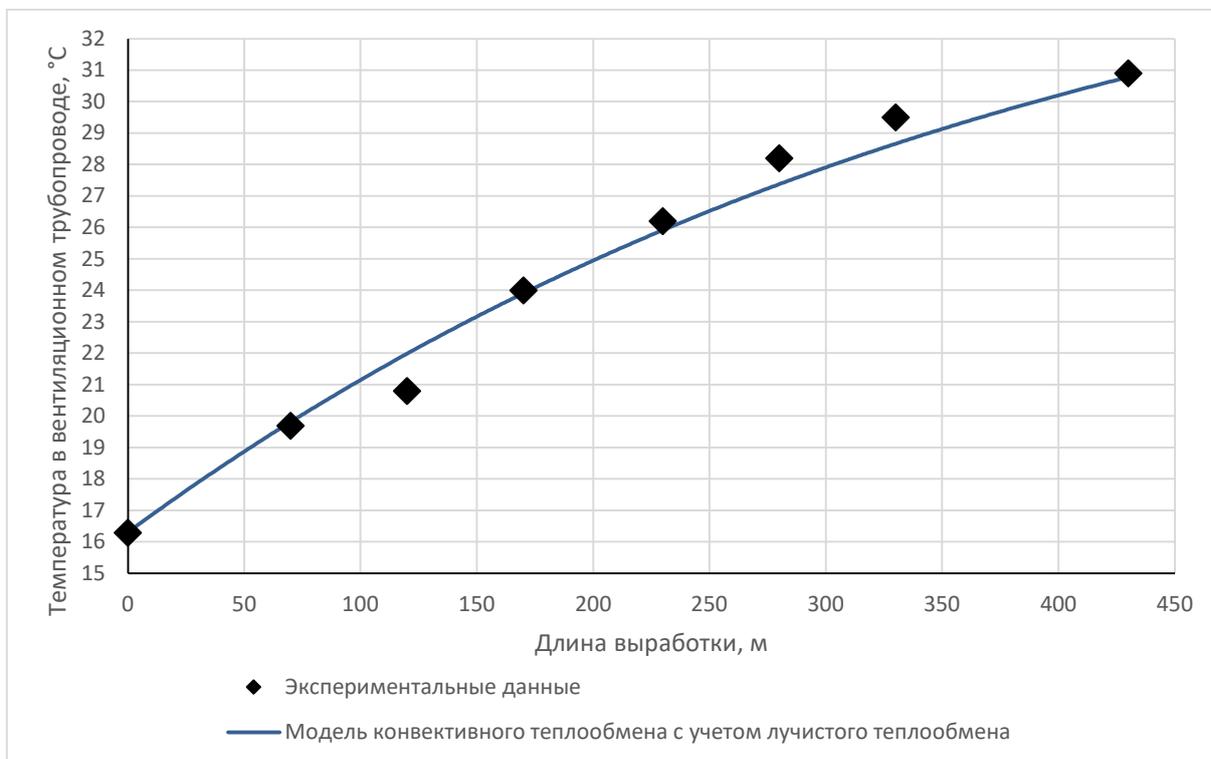


Рисунок 3 — Результаты моделирования с учетом лучистого теплообмена

Кроме лучистого теплообмена на конечное теплораспределение в тупиковой выработке существенное влияние оказывают скорость проходки и нагрев воздуха от вентилятора местного проветривания (ВМП). Скорость проходки определяет какая площадь поверхности выработки, обнажается ежедневно. Обнаженная поверхность имеет температуру нетронутого породного массива, которая вносит дополнительный вклад в нагрев воздуха на конечном участке вентиляционного трубопровода. Вентилятора местного проветривания является постоянным источником тепловыделений, поступающих напрямую в тупиковую выработку, вся мощность которых идет на нагрев подаваемого объема воздуха. Результаты экспериментальных исследований показывают, что нагрев воздуха на ВМП может достигать 7-8 °С. Таким образом, данные факторы необходимо учитывать при прогнозировании теплораспределения в тупиковых выработках.

Для решения задач разработки систем управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках необходим инструмент, позволяющий прогнозировать теплораспределение. Для этого предложена математическая модель теплораспределения в тупиковой горной выработке, учитывающая лучистый и конвективный теплообмен, движение забоя выработки и нагрев от вентиляционного оборудования в системе «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода – воздух в вентиляционном трубопроводе».

Геометрически в модели трубопровод, выработка и массив представлены в виде цилиндров с круговым сечением. Допускается, что трубопровод центрирован относительно продольной оси выработки и не соприкасается с ее стенками, а выработка, в свою очередь, находится в центре массива, как показано на рисунке 4.

Принимается, что распределение теплофизических параметров в массиве (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность) однородно и изотропно. Также однородными и постоянными во времени принимаются скорости воздуха в трубопроводе и выработке. Поверхности трубопровода и выработки также однородны.

Теплофизические процессы принимаются нестационарными. Однако, поскольку время протекания теплофизических процессов в трубопроводе и выработке значительно меньше, чем в

массиве, то теплоперенос в выработке и трубопроводе принимается квазистационарным и явно от времени не зависит.

В связи с выраженным турбулентным течением воздуха в выработке и трубопроводе принимается, что в них температура воздуха по поперечному сечению выравнивается моментально. Теплопередача в воздухе не учитывается. По этим причинам и из-за наличия пространственной симметрии теплоперенос в рассматриваемой системе можно свести до двумерного случая в поперечном сечении. При этом трубопровод и выработку можно свести до одномерных объектов и рассматривать теплоперенос в них только вдоль направления течения воздуха. Влияние влагообмена на теплораспределение в выработке учитывается в неявном виде.

Между трубопроводом и породным массивом учитывается наличие лучистого теплообмена. При этом рудничная атмосфера считается полностью прозрачной для теплового излучения.

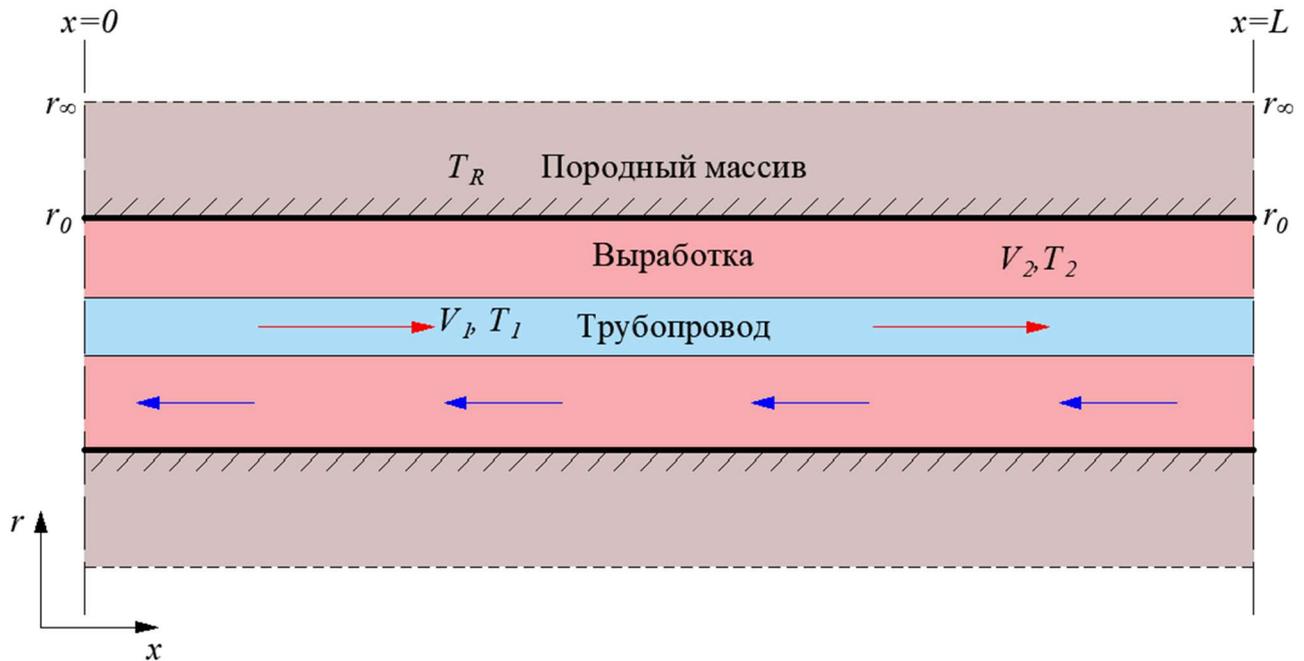


Рисунок 4 — Схема к постановке задачи теплообмена между воздухом в вентиляционном трубопроводе, воздухом в горной выработке и породным массивом

С учетом принятых допущений модель сопряженного теплообмена системы «вентиляционный трубопровод – выработка – породный массив» описана системой уравнений (2) – (4):

теплоперенос внутри вентиляционного трубопровода:

$$G_1 \cdot c \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} = (T_{w0} - T_1) \cdot k_{wi} \cdot \pi + q(x), \quad (2)$$

теплоперенос в выработке:

$$G_2 \cdot c \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} = (T_{w0} - T_1) \cdot a_{w0} \cdot P_{w0} + (T_R - T_2) \cdot a_R \cdot P_R + q(x), \quad (3)$$

теплоперенос в породном массиве:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T_R}{\partial t} = \lambda_R \cdot \Delta T_R, \quad (4)$$

где T_1 – температура воздуха внутри вентиляционного трубопровода, °С; T_2 – температура воздуха в выработке, °С; T_R – температура породного массива, °С; T_{w0} – температура внешней поверхности стенки вентиляционного трубопровода, °С; ρ – плотность воздуха, кг/м³; c – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); S_1 , S_2 – площадь поперечного сечения вентиляционного трубопровода и выработки, соответственно, м²; G_1 – массовый расход воздуха

внутри вентиляционного трубопровода, кг/с; G_2 – массовый расход воздуха в выработке, кг/с; λ_R – теплопроводность породного массива, Вт/(м·°С); Δ – оператор Лапласа; k_{wi} – линейный коэффициент теплопередачи через стенку трубопровода и пограничный слой воздушного потока на внутренней границе трубопровода, Вт/(м·°С); $q(x)$ – приведенная мощность точечного теплового источника (вентилятора), Вт/м; a_{wo} – коэффициент теплоотдачи воздуха снаружи вентиляционного трубопровода, Вт/(м²·°С); P_{wo} – периметр наружной стенки трубопровода, м; a_R – коэффициент теплоотдачи воздуха на поверхности выработки, Вт/(м²·°С); P_R – периметр горной выработки, м; ε_n – приведенная степень черноты поверхности тел, участвующих в теплообмене; $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Граничные условия для (2) – (4):

$$\begin{aligned} (T_{wo} - T_1) \cdot k_{wi} \cdot \pi \\ = (T_2 - T_{wo}) \cdot a_{wo} \cdot P_{wo} + \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot P_{wo} \\ \cdot \left[\left(\frac{T_R + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{wo} + 273}{100} \right)^4 \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$T_1 \Big|_{x=0} = T_{1,0}, \quad (6)$$

$$T_2 \Big|_{x=L} = T_{1,L}, \quad (7)$$

$$\lambda_R \frac{\partial T_R}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \left\{ (T_R - T_2) \cdot a_R + \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_R + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{wo} + 273}{100} \right)^4 \right] \right\} \Big|_{r=r_0}, \quad (8)$$

$$T_R \Big|_{r=r_\infty} = T_{R,0}, \quad (9)$$

$$\lambda_R \frac{\partial T_R}{\partial x} \Big|_{x=0, x=L} = 0. \quad (10)$$

Коэффициент k_{wi} определяется по формуле:

$$k_{wi} = \frac{1}{\frac{1}{a_{in} d_{in}} + \frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}}}, \quad (11)$$

где a_{in} – коэффициент теплоотдачи воздуха в пограничном слое на внутренней стенке вентиляционного трубопровода, Вт/(м²·°С); d_{in} – внутренний диаметр вентиляционного трубопровода, м; λ_w – коэффициент теплопроводности стенки вентиляционного трубопровода, Вт/(м·°С); d_{out} – внешний диаметр вентиляционного трубопровода, м.

Приведенная степень черноты (ε_n) определяется по формуле:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{P_{wo}}{P_R} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (12)$$

где ε_1 и ε_2 – степени черноты поверхности вентиляционного трубопровода и выработки, принимаются по справочникам.

Вычислительная сетка трубопровода, выработки и массива увеличивается в процессе моделирования по координате x , т. е. является динамической. Увеличение вычислительной сетки обусловлено учетом увеличения со временем длины выработки в процессе проходческих работ. Алгоритмически данный процесс можно описать так:

- 1) в процессе моделирования задаётся скорость увеличения длины выработки;
- 2) перестроение вычислительной сетки трубопровода, выработки и массива на новую длину может осуществляться двумя способами. Первый – перестроение происходит один раз за каждый технологический цикл добычи на длину проходки (при буровзрывном способе).

Второй – перестроение происходит при достижении длины выработки следующего шага вычислительной сетки по координате x (в случае добычи при помощи комбайна);

- 3) для новой геометрической области задаются начальные условия, в области с предыдущей длиной выработки берутся значения температуры с последнего временного шага путем интерполяции.
- 4) Температуры в реконструированных ячейках старой части геометрии определяются методом линейной интерполяции.

Разработанная математическая модель теплообмена в системе «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода – воздух в вентиляционном трубопроводе» учитывает движение забоя выработки, тепловыделения от техногенных источников и лучистый теплообмен. Результаты модельного теплораспределения выводятся в графическом виде (см. рисунок 5), а при необходимости — численно в виде полей точек и графиков.

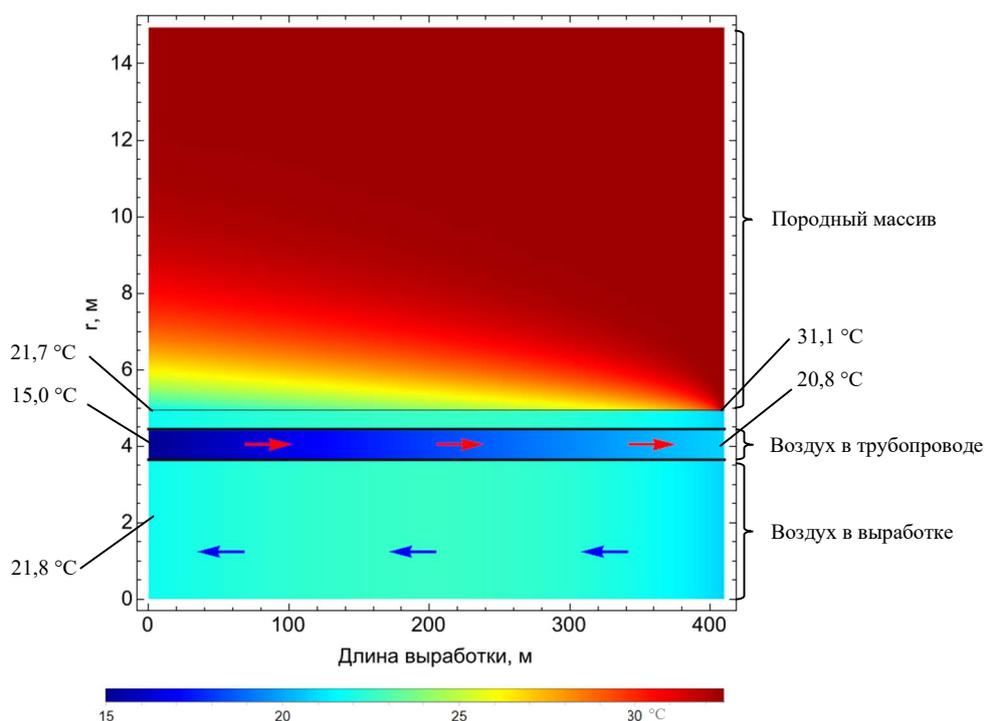


Рисунок 5 — Модельное теплораспределение в тупиковой выработке

Разработанная математическая модель позволила произвести оценку степени влияния лучистого теплообмена на интенсивность нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе. В результате было установлено, что соотношение лучистого и конвективного теплообмена при нагреве воздуха не зависит от температуры воздуха, подаваемого в вентиляционный трубопровод, но зависит от расхода воздуха. Вклад лучистого теплообмена составил от 77 (при расходе воздуха 2,5 м³/с) до 38 % (при расходе воздуха 20 м³/с). Таким образом, в рассматриваемых диапазонах расхода воздуха для тупиковых выработок лучистый теплообмен оказывает значительное влияние на нагрев воздуха в вентиляционном трубопроводе.

II научное положение

Способ снижения нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе при нагнетательном способе проветривания с помощью увеличения термического сопротивления стенки и снижения излучательной способности внешней поверхности трубопровода позволяет управлять микроклиматом в призабойном пространстве тупиковой горной выработки.

Учет нового механизма теплообмена в тупиковой горной выработке позволяет иначе взглянуть на известные горнотехнические способы управления тепловым режимом и предложить новый. К существующим способам можно отнести:

- изменение сечения вентиляционного трубопровода;
- изменение объема подачи воздуха;
- изменение площади сечения выработки;
- подбор теплоизоляции вентиляционного трубопровода.

К новому – покрытие стенок вентиляционного трубопровода материалами со сниженным значением степени черноты.

Данные теплотехнические способы имеют различную эффективность, которая зависит от длины тупиковой выработки, в которой они применяются. Для оценки их эффективности предложен критерий, который определяется по формуле:

$$K(L) = \frac{\Delta T_3}{\Delta T_B}, \quad (13)$$

где ΔT_3 – изменение температуры воздуха на выходе из трубопровода при применении способов управления, °С; ΔT_B – изменение температуры (нагрев) воздуха в вентиляционном трубопроводе и ВМП без применения способов управления, °С.

Критерий эффективности показывает, насколько хорошо тот или иной способ снижает температуру воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода в зависимости от длины выработки. Если критерий эффективности выше 0, то применяемый способ управления снижает температуру воздуха, если ниже - повышает. Максимальное значение критерия эффективности, достигаемое горнотехническими способами, не может быть выше 1.

Для определения $K(L)$ была выполнена серия расчетов теплораспределения с параметрами существующей тупиковой горной выработки. В результате был получен график критерия эффективности (см. рисунок 6).

На основе полученной эффективности различных способов управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках, горнотехнические способы можно поделить на две группы по направленности их действия:

- снижающие нагрев воздуха на ВМП (к ним относятся уменьшение расхода воздуха и увеличение диаметра вентиляционного трубопровода);
- снижающие интенсивность нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе (к ним относятся: снижение степени черноты трубопровода; теплоизоляция трубопровода, увеличение сечения выработки).

К достоинствам первой группы способов можно отнести существенное снижение нагрева воздуха на ВМП, что дает положительный результат в коротких выработках. Недостатком же является более интенсивный нагрев воздуха в трубопроводе.

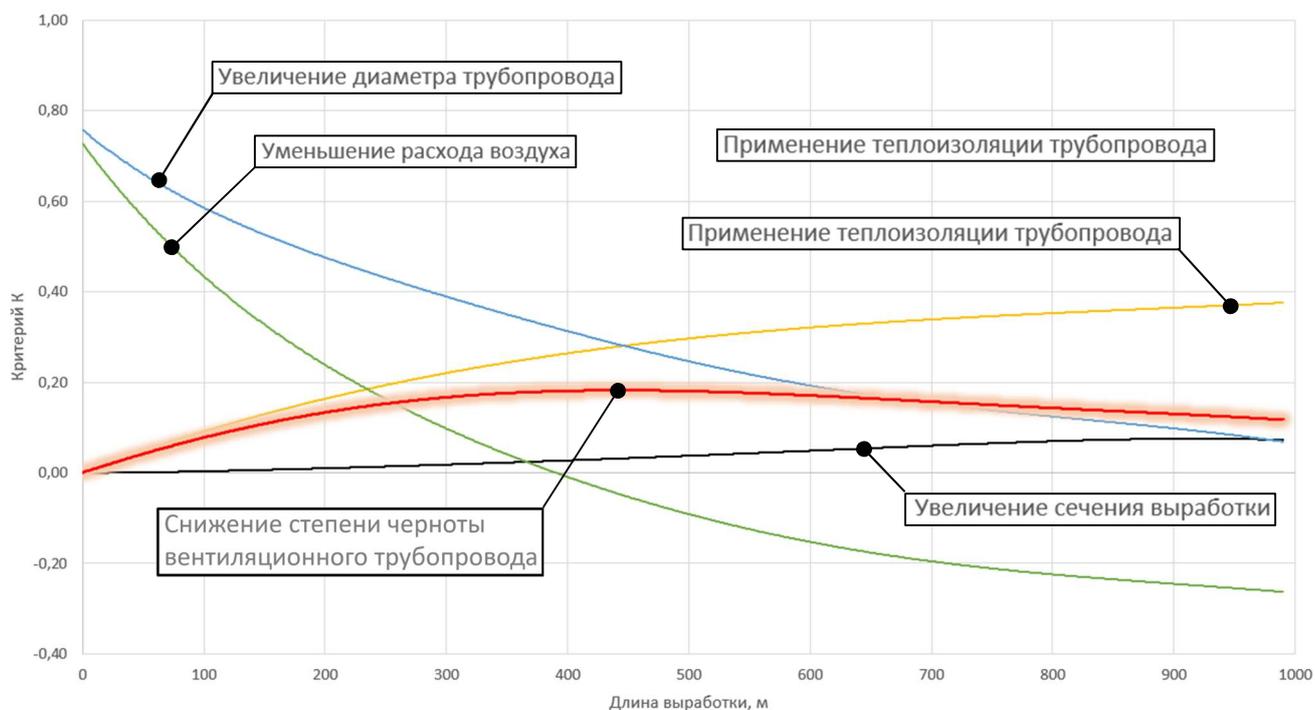


Рисунок 6 — Критерий эффективности различных горнотехнических способов снижения температуры в забое выработки

Достоинство вторых – снижение температуры в длинных выработках, причем, чем длиннее выработка, тем выше эффективность. Недостатком является более высокая температура воздуха после ВМП.

Применение нового способа управления тепловым режимом за счет снижения степени черноты внешней поверхности стенки трубопровода позволило в нем снизить интенсивность нагрева воздуха. В качестве материала поверхности вентиляционных трубопроводов возможно применение неокрашенной оцинкованной стали ($\epsilon = 0,23$) для жестких труб и покрытие фольгой ($\epsilon = 0,04$) гибких труб. В таблице 1 приведены значения степени черноты для некоторых материалов поверхности вентиляционного трубопровода.

Таблица 1 — Степень черноты некоторых материалов поверхности вентиляционного трубопровода

Материал поверхности вентиляционного трубопровода	Степень черноты материала (ϵ_1)
Резина	0,945
Оцинкованная сталь	0,23
Фольга	0,04

Данный способ позволяет снижать интенсивность нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе, при этом практически не увеличивая его вес и сохраняя прежние габариты трубопровода. Наибольшая эффективность применения данного способа достигается при низких расходах воздуха. Кроме того, комбинация данного способа с теплоизоляцией позволяет снизить толщину теплоизоляционного слоя, тем самым уменьшая габариты и вес теплоизолированного трубопровода. Так, согласно результатам моделирования теплораспределения тупиковой горной выработки полиметаллического рудника, слой минеральной ваты толщиной 15 мм, покрытый фольгой, показал такую же эффективность, как и слой минеральной ваты 25 мм, покрытый резиной.

III научное положение:

Методика разработки систем управления тепловым режимом тупиковых горных выработок, включающая алгоритм выбора способов регулирования микроклиматических параметров на основе многовариантного численного моделирования теплораспределения воздуха, позволяет обосновывать технические решения для обеспечения требуемой температуры воздуха в рудничной атмосфере.

Современные методики управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках предполагают использование в основном теплотехнических способов управления (СКВ) без комбинации с горнотехническими, опираясь на устаревшие способы прогнозирования теплораспределения. Это приводит к принятию неверных технических решений, в результате чего требуемые параметры температуры воздуха в рабочих зонах не достигаются или холодопроизводительность систем имеет завышенные значения.

Применение технических решений на основе результатов расчета теплораспределения с помощью разработанной математической модели и комбинаций горнотехнических и теплотехнических способов позволяет обеспечить требуемую температуру воздуха в рабочей зоне тупиковой выработки. Для достижения требуемой температуры была предложена методика разработки систем управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках.

Методика состоит из 3-х этапов:

1. построение математической модели тупиковой горной выработки;
2. определение эффективности горнотехнических способов обеспечения допустимых микроклиматических условий и их комбинаций;
3. определение требуемой холодопроизводительности СКВ.

Для построения математической модели в расчетную программу вносятся теплофизические параметры выработки.

Далее производится расчет теплораспределения на максимальный период развития выработки. После этого определяется наличие превышения требуемой температуры воздуха в забое выработки. В случае, если имеет место превышение температуры воздуха в рабочей зоне, производится анализ полученной информации. Если температура воздуха перед ВМП выше 23 °С, то расчет переходит на этап подбора СКВ. Если температура воздуха перед ВМП ниже 23 °С, то производится подбор теплотехнических способов снижения температуры воздуха.

При подборе горнотехнических способов определяется основной источник приращения температуры воздуха. Если это ВМП, то сначала применяются способы, направленные на снижение нагрева от него. Если основной нагрев происходит в вентиляционном трубопроводе, то применяются способы, направленные на его снижение. Методика предусматривает применение наиболее эффективных горнотехнических способов управления микроклиматом в призабойной части тупиковой выработки, а именно: увеличение диаметра вентиляционного трубопровода, снижение степени черноты внешней поверхности вентиляционного трубопровода, применение теплоизоляции вентиляционного трубопровода и комбинаций перечисленных способов.

При достаточности горнотехнических способов СКВ не применяется. Если горнотехнических способов недостаточно для нормализации температуры в рабочей зоне, то применяется СКВ. Разработка СКВ начинается без учета ранее разработанных горнотехнических способов. Определяется температура воздуха после воздухоохладителя, при которой удастся достичь требуемой температуры воздуха в рабочей зоне. Температура воздуха после воздухоохладителя не должна быть ниже +10 °С, иначе подбор оборудования СКВ будет

сопряжен со сложными и дорогостоящими техническими решениями или принципиально невозможен. В случае, если при охлаждении до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ обеспечить подачу воздуха в рабочую зону с требуемой температурой не получается, необходимо применение горнотехнических способов, направленных на снижение интенсивности нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе.

Горнотехнические способы так же применяются в том случае, если СКВ обеспечивает требуемую температуру воздуха, но нагрев воздуха в трубопроводе превышает $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае проверяется, позволяют ли габариты выработки дополнительно увеличить размер вентиляционного трубопровода. В случае достаточного количества места, толщину теплоизоляции увеличивают, пока нагрев воздуха в вентиляционном трубопроводе не станет ниже $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Принципиально алгоритм данной методики можно представить в виде блок-схемы (см. рисунок 7).

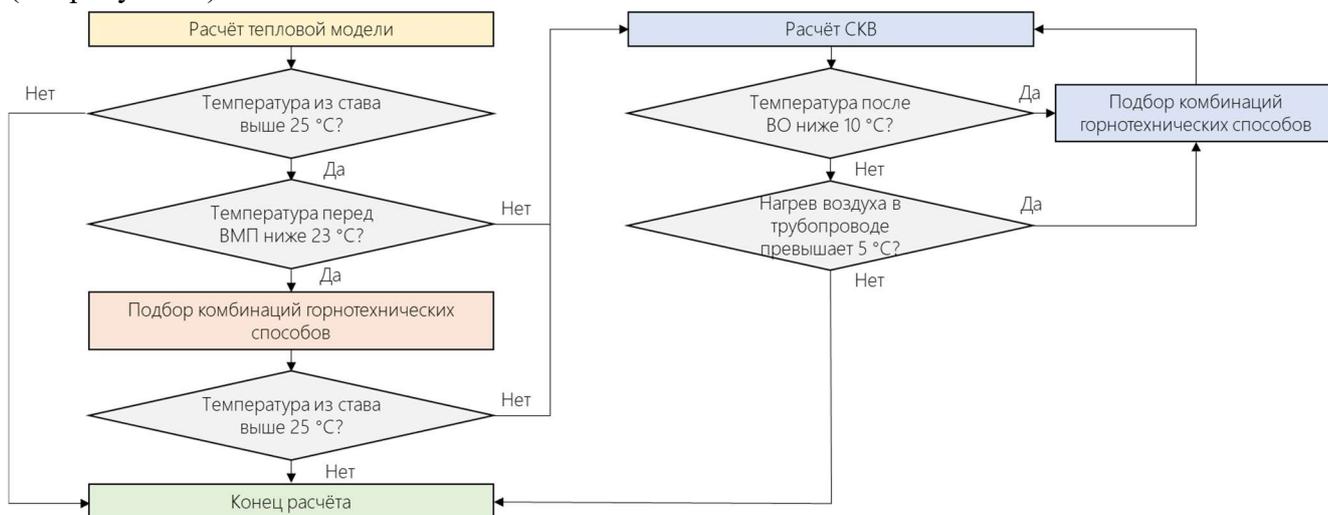


Рисунок 7 — Блок-схема алгоритма методики управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках

Предложенная выше методика применена при проходке выработки на строящемся руднике в Норильском промышленном районе на глубине 1940 м, где температура окружающего породного массива достигает $47\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данная выработка должна соединить два ствола, в результате чего, на максимальный период развития её длина достигнет 1800 м. Проветривание выработки осуществляется по вентиляционному трубопроводу с поверхности. Из-за особенности формирования микроклимата в стволе, через который подается воздух для проветривания выработки, температура воздуха в вентиляционном трубопроводе на сопряжении ствола с выработкой является постоянной и составляет $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эта особенность позволила сократить область моделирования и не учитывать теплообмен в стволе. Движение воздуха по выработке осуществляется по вентиляционному трубопроводу диаметром 1,2 м с помощью двух ВМП, один из которых расположен в начале выработки, а второй - на расстоянии 1000 м от устья (см. рисунок 8).

Модельное теплораспределение в тупиковой выработке без применения способов управления тепловым режимом представлено на рисунке 9. Результаты определения температуры воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода с различными способами управления тепловым режимом приведены в таблице 2.

Согласно полученным результатам, обеспечить рабочую зону только горнотехническими способами требуемой температурой воздуха не удалось. Охлаждение воздуха до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в устье выработки позволяет снизить температуру на выходе из вентиляционного трубопровода только

до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для обеспечения температуры воздуха на выходе из трубопровода ниже $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ необходимо применение теплоизоляции из минеральной ваты толщиной 15 мм и покрытие трубопровода фольгой.

Итоговым решением стало охлаждение воздуха до $+19,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ с помощью СКВ (см. рисунок 10) и применение теплоизоляции толщиной 100 мм, покрытой фольгой (см. рисунок 11).

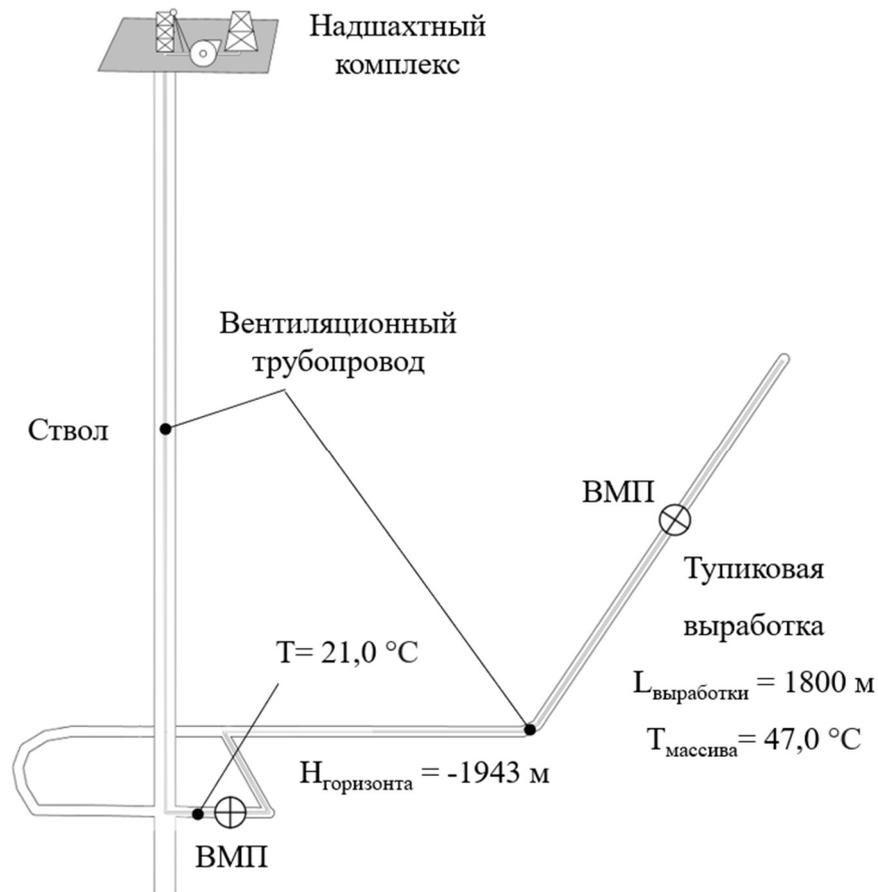


Рисунок 8 — Принципиальная схема выработки

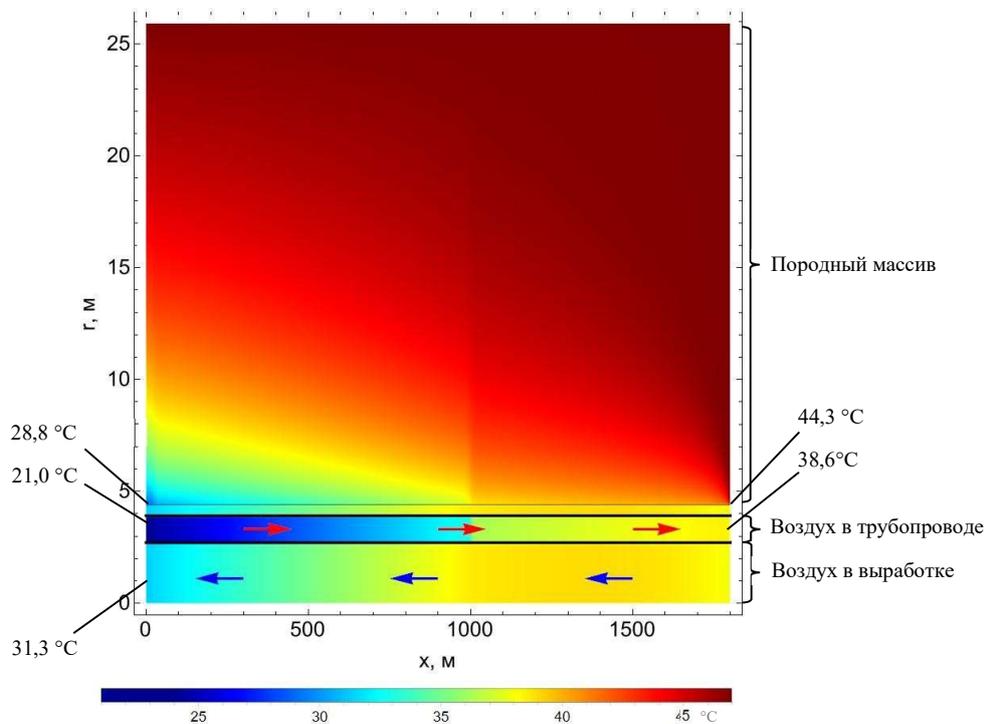


Рисунок 9 — Модельное теплораспределение в тупиковой выработке без применения способов управления тепловым режимом

Таблица 2 — Результаты моделирования теплораспределения в выработке

Способы управления тепловым режимом	Температура воздуха, подаваемого в забой, °С
Без способов	+38,6
Горнотехнические способы	
Увеличение диаметра трубопровода с 1,2 до 1,4 м	+37,0
+ Покрытие трубопровода фольгой	+36,0
+ 100 мм теплоизоляции	+29,4
Теплотехнические и горнотехнические способы	
Охлаждение воздуха до температуры +10 °С	+35,0
+ Покрытие трубопровода фольгой	+30,5
+ 15 мм теплоизоляции трубопровода	+23,7
Финальное решение	
Охлаждение воздуха до температуры +19,2 °С	+25,0
+ Покрытие трубопровода фольгой	+25,0
+ 100 мм теплоизоляции трубопровода	+25,0



Рисунок 10 — Система кондиционирования воздуха, применяемая в выработке



Рисунок 11 — Теплоизолированный трубопровод применяемый в выработке

Разработанные технические решения позволили обеспечить допустимые микроклиматические условия в рабочей зоне и закончить проходку протяженной выработки в условиях повышенных температур окружающего породного массива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа содержит решение научно-практической задачи по обеспечению требуемых температур воздуха в рабочей зоне тупиковой выработки. В ходе выполнения работы получены следующие научные результаты:

1. выполнены экспериментальные исследования, которые показали, что на интенсивность нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе существенное влияние оказывает лучистый теплообмен между поверхностью вентиляционного трубопровода и породным массивом;
2. разработана математическая модель теплораспределения в вентиляционном трубопроводе в тупиковой горной выработке, учитывающая теплообмен в системе «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода – воздух в вентиляционном трубопроводе», движение забоя выработки, тепловыделения от техногенных источников и лучистый теплообмен, позволяющая рассчитывать микроклиматические условия в тупиковой выработке;
3. определена эффективность различных способов управления тепловым режимом в тупиковых выработках и их комбинаций;
4. предложен новый способ управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках – с помощью изменения приведенной степени черноты. Его особенностью является возможность снижения интенсивности нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе без изменения геометрических размеров вентиляционного трубопровода и выработки, что дает преимущество перед применением теплоизоляций в стеснённых условиях;
5. предложен новый способ расчета местных СКВ с учетом применения теплоизолированных вентиляционных труб, который позволяет обеспечить требуемой температурой воздуха рабочие зоны протяженных тупиковых выработок;
6. разработана методика управления тепловым режимом тупиковых горных выработок на основе разработанной математической модели, позволяющая достигать требуемых микроклиматических параметров в тупиковых горных выработках.

СПИСОК РАБОТ
опубликованных автором по теме диссертации

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

1. Ольховский Д. В., Зайцев А. В., Семин М. А. Анализ изменения холодопроизводительности систем кондиционирования воздуха в условиях рабочих зон глубоких рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – №. 12. – С. 110-119.
2. Ольховский, Д. В., Зайцев, А. В., Шалимов, А. В., Давыдов, А. А. Способы нормализации микроклимата в глубоких протяженных тупиковых выработках // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – №. 12. – С. 200-210.
3. Ольховский Д. В., Зайцев А. В., Уткин Н. Н., Дарбинян Т. П., Давыдов А. А. О влиянии роста давления воздуха с глубиной на расчет требуемого количества воздуха в глубоких рудниках // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 8. С. 89–94. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-8-89-94
4. Ольховский Д. В., Паршаков О. С., Бублик С. А., Исследование динамики газовой обстановки подземных выработок после проведения взрывных работ // Горные науки и технологии. 2023. № 8 (1). С. 47–58. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-86>
5. Olkhovsky D., Zaitsev A., Bublik S. Study on the influence of radiation heat transfer on microclimatic parameters in the blind heading of a deep potash mine // International Journal of Thermal Sciences. – 2024. – Т. 199. – С. 108904.
6. Zhelnin, M., Kostina, A., Plekhov, O., Zaitsev, A., & Olkhovskiy, D. Numerical Simulation on Temperature and Moisture Fields Around Cooling Towers Used in Mine Ventilation System // Fluids. – 2022. – Т. 7. – №. 10. – С. 317.

Публикации в других изданиях

1. Зайцев А., Кузьминых Е., Ольховский Д. Безопасность реверсирования воздушных потоков в шахтах и рудниках в холодное время года // Вестник государственной экспертизы. – 2022. – №. 1. – С. 66-73.

Сдано в печать _____ 2024 г.
Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ
«ГИ УрО РАН»
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А