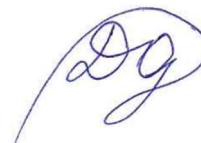


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Ольховский Дмитрий Владимирович

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

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Зайцев Артем Вячеславович

Пермь 2024

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

КПД – коэффициент полезного действия;

СКВ – система кондиционирования воздуха;

ВО – воздухоохладитель;

РВ-1 – разведочная выработка – 1;

РВ-2 – разведочная выработка – 2;

ВМП – вентилятор местного проветривания.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Микроклиматические условия в выработках глубоких шахт	10
1.2 Методы прогнозирования теплового режима в тупиковых выработках	13
1.3 Способы управления тепловым режимом в тупиковых выработках	20
1.4 Методы расчета систем кондиционирования воздуха для тупиковых выработок	27
1.5 Цель и задачи исследования	29
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА В ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ	30
2.1 Экспериментальные исследования процессов формирования микроклимата в тупиковых горных выработках	31
2.2 Математическое моделирование процессов формирования теплового режима тупиковых горных выработок	37
2.3 Калибровка математической модели	42
2.4 Оценка влияния лучистого теплообмена на нагрев воздуха в вентиляционном трубопроводе	45
2.5 Выводы по главе	49
3 ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ГОРНОТЕХНИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ	51
3.1 Постановка задачи	51
3.2 Исследование эффективности различных способов управления тепловым режимом тупиковой выработки	53
3.3 Изменение степени черноты	61
3.4 Эффективность горнотехнических методов	63
3.5 Комбинированное применение горнотехнических методов	65
3.6 Выводы по главе	71
4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ДЛЯ ГЛУБОКИХ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК	72
4.1 Совершенствование расчета требуемой холодильной мощности воздухоохладителя при повышенном давлении воздуха	72
4.2 Разработка технических решений по теплоизоляции вентиляционных трубопроводов	79
4.3 Оценка снижения холодопроизводительности системы кондиционирования воздуха от растепления породного массива	83
4.4 Выводы по главе	87
5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК	88

5.1	Методика разработки систем управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках	88
5.2	Разработка программы расчета микроклиматических параметров в тупиковых выработках	95
5.3	Разработка технических решений по нормализации микроклиматических условий при строительстве выработки РВ-2 в Норильском промышленном районе.....	100
5.4	Выводы	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		115
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ		116

ВВЕДЕНИЕ

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., Пашиняна Л. А., Бажина Т. П., Зимина 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., Черняка 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., Черняка 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 выработок 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.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Микроклиматические условия в выработках глубоких шахт

Микроклиматические условия в рабочих зонах определяются сочетаниями параметров температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, а также тепловым излучением от нагретых поверхностей. Наибольшее влияние на тепловой комфорт шахтеров в условиях рабочих зон рудников оказывают температура и относительная влажность воздуха [21]. Данные параметры зависят от множества факторов [11, 39, 73, 74, 76]:

- температуры, относительной влажности и объема воздуха, подаваемого в ствол рудника [22];
- глубины ведения работ, которая приводит к гидростатическому нагреву воздуха;
- температуры окружающего породного массива (зависящей от глубины ведения работ, теплофизических свойств пород, геотермальной обстановки и окислительных процессов);
- удаленности рабочих зон от воздухоподающего ствола;
- разветвленности вентиляционной сети и схемы проветривания рудника;
- тепловыделений от технологического оборудования и других местных источников тепла в выработках (СДО, ВМП, компрессорные, застывающий закладочный материал и др.)
- влагообмен в выработках.

На территории Российской Федерации в шахтах регламентируется и отслеживается только температура воздуха. Основным фактором, определяющим температуру воздуха в шахте, является теплообмен с породным массивом. Уже на расстоянии 1,5–2 км от воздухоподающих стволов температура воздуха практически равна температуре окружающего породного массива. В настоящее время многие горнодобывающие предприятия для поддержания и увеличения своих производственных мощностей вынуждены вовлекать в отработку все более глубокие залежи полезных ископаемых [98] и применять высокопроизводительное оборудование. По мере увеличения глубины ведения горных работ температуры окружающих пород растут, что при возросших мощностях и тепловыделениях от оборудования приводит к росту и превышению допустимых значений температуры воздуха в рабочих зонах [105, 119, 101].

Верхнее значение допустимой температуры воздуха в России устанавливается Федеральными нормами и правилами «Правила безопасности при ведении горных работ

...» [64] и составляет 26 °С. Такая температура должна обеспечивать нормальную терморегуляцию человека, одетого в спецодежду и выполняющего технологические операции.

Наиболее сложная ситуация с температурой воздуха наблюдается в рабочих зонах тупиковых горных выработок. Этому способствует одновременное влияние на формирование температуры воздуха определенных факторов: удаленности данных выработок от воздухоподающих стволов (в результате чего температура на подходе к ВМП близка к температуре окружающего породного массива); нагрев от работы ВМП при подаче воздуха в забой выработки; нагрев воздуха от работающего СДО; повышенная температура пород непосредственно в самих тупиковых выработках (в связи с их относительно недавним вскрытием и медленным растеплением).

На территории СНГ наиболее высокие температуры в рабочих зонах наблюдаются в шахтах Донбасса [3, 42], руднике Гремячинского ГОКа [25], руднике «Таймырский» в Норильске [32, 38, 58], руднике 4 РУ в Беларуси [1]. Аналогичные проблемы встречаются в рудниках Австралии [86, 85], Южноафриканской Республики (ЮАР) [112, 108], Бразилии [40], Индии [40], Канады [91], Китая [114]. Тепловые условия некоторых шахт приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Тепловые условия глубоких рудников

Месторождение, рудник	Глубина ведения работ, м	Температура нетронутых пород, °С	Максимальная температура воздуха, наблюдаемая в рабочих зонах рудника, °С
Шахта им. А. Ф. Засядько (Донбасс)	1200	43 - 47	44
Рудник «Таймырский» ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель»	1600	38 - 40	45
Рудник Гремячинского ГОК ООО «Еврохим-ВолгаКалий»	1100	32	41
Рудник 4 РУ ОАО «Беларуськалий»	850	19 - 25	35
Рудник Enterprise (Австралия)	2000	60	-
Шахта Моранба (Австралия)	500	50	-
Рудник Морро-Вельхо (Бразилия)	2300	54	52
Рудник Нандидруг (Индия)	2100	53	54

Месторождение, рудник	Глубина ведения работ, м	Температура нетронутых пород, °С	Максимальная температура воздуха, наблюдаемая в рабочих зонах рудника, °С
Рудники Витватерсранда (ЮАР)	4000	60	-
Рудники Района Садбери (Канада)	1800	32 - 35	-
Угольная шахта в г. Сюйчжоу (Китай)	1000	38	36

Для охлаждения всего воздуха, подаваемого в рудник, требуются десятки МВт холодильной мощности [87]. Например, в Австралии рудник Mount Isa имеет поверхностную систему кондиционирования мощностью 36 МВт [111, 86]. На более глубоких рудниках одного поверхностного охлаждения воздуха недостаточно, поэтому применяются сложные многоступенчатые системы охлаждения с применением бинарного льда, в результате чего в ЮАР на руднике Мпоненг суммарная холодопроизводительность установок составляет 80 МВт [85]. Для того, чтобы работа рудника при использовании столь мощных систем охлаждения оставалась рентабельной, необходима либо высокая стоимость добываемой руды, либо наличие близко расположенного дешевого источника холода. В качестве такого источника может быть использовано глубокое озеро соответствующего размера. Подобные проекты реализуются в Канаде [97].

Так как воздух, охлаждаемый на поверхности, быстро нагревается при движении по выработкам, а часть его тратится на компенсацию утечек, наиболее экономически эффективным становится охлаждать воздух, поступающий непосредственно в рабочие зоны рудника. Снижение затрат на охлаждение воздуха в шахте позволит сделать доступными большое количество залежей, которые на данный момент считаются нерентабельными. Для этого при проектировании необходим инструмент прогнозирования теплораспределения в руднике на весь период его эксплуатации, а также в тупиковых выработках. В настоящее время начали появляться программные продукты позволяющие считать прогнозное теплораспределение во всей вентиляционной сети рудника, например аналитический комплекс «АэроСеть» [23], однако они имеют ограниченные возможности по прогнозированию теплораспределения в тупиковых выработках. А специализированные программные продукты, учитывающие все особенности формирования теплораспределения в тупиковых горных выработках

отсутствуют, в связи с чем, точность определения требуемой холодопроизводительности воздухоохладителей и эффективность применяемых горнотехнических способов управления тепловым режимом в тупиковых выработок остается низкой.

С учетом проведенного обзора выполнен более детальный анализ состояния вопросов прогнозирования и управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках глубоких рудников по следующим направлениям:

- в разделе 1.2 представлен мировой опыт прогнозирования теплового режима в тупиковых выработках глубоких рудников; 1.2
- в разделе 1.3 рассмотрены методы управления тепловым режимом в тупиковых выработках;
- в разделе 1.4 представлены существующие методы определения требуемой холодильной мощности воздухоохладителей и систем кондиционирования тупиковых выработок с повышенными температурами воздуха.

1.2 Методы прогнозирования теплового режима в тупиковых выработках

Методам прогнозирования теплового режима рудников посвящены работы Ю. Д. Дядькина [17, 18, 19], В. Я. Журавленко [76], В. Н. Скубы [57], Ю. В. Шувалова [70], Ю. А. Цейтлина [67], В. А. Шелиманова [77], Ф. С. Клебанова, В. А. Костина [31], П. Сухана [61], И. Росса [56], О. Г. Щукина [81], А. Н. Щербаня [74, 78], О. А. Кремнева [74], А. Ф. Воропаева [11, 14], А. Ф. Галкина [15], С. Г. Гендлера [6], Э. Н. Малашенко [41], П. Я. Богинского [6], Ш. И. Ониани [53], В. А. Стукало [60], А. Н. Янгельского [83], Э. И. Баратова, В. П. Черняка [5], А. Б. Зимина [27, 26], Ю. М. Смирнова [58], Д. Е. Соловьева [59]. Из них более локальной проблеме теплового режима в тупиковых выработках посвящены работы А. Н. Щербаня, О. А. Кремнева, А. Ф. Воропаева, А. Ф. Галкина, С. Г. Гендлера, Э. Н. Малашенко, П. Я. Богинского, Ш. И. Ониани, В. А. Стукало, А. Н. Янгельского, Э. И. Баратова, В. П. Черняка, А. Б. Зимина, Ю. М. Смирнова, Д. Е. Соловьева, а так же ряда зарубежных авторов Knechtel J., Maciejewska-Soltys W. [95], De Broaf W. L. [89], Jordan D. W. [94], В. Кертиков [29, 30, 28], J. Voss [113].

Методы прогнозирования теплового режима в выработках можно разделить на эмпирические, полуэмпирические, аналитические и численные. Эмпирические и полуэмпирические методы базируются на закономерностях формирования теплового режима определенных по результатам многочисленных экспериментальных замеров. Достоинство таких методов заключается в относительной простоте расчётных формул. Недостатками являются невысокая точность прогноза, которая снижается с увеличением

периода прогнозирования, ограниченная область применения и линейное распределение температуры по длине выработки.

Аналитические методы решений разделяют на два типа: в первом решают уравнения теплового баланса; во втором решают сопряженные задачи тепломассопереноса.

Уравнения теплового баланса могут быть составлены в алгебраическом и дифференциальном виде. В первом случае, недостатками прогнозирования будут являться усреднение некоторых исходных величин, которые по факту являются переменными, и прогнозирование параметров не по всей длине выработки, а только на конечных участках. Их достоинством является простота решений системы уравнений. Во втором случае прогноз температур возможен в любой точке выработки, однако получаемые уравнения слишком громоздки и сложны для практического применения.

Наиболее современными методами прогнозирования являются численные. Они начали получать широкое распространение в 70 - 90 годы XX века в период развития и увеличения доступности вычислительной техники. Эти методы позволяют с более высокой точностью и скоростью рассчитывать теплораспределение в выработках.

Историю развития методов прогнозирования теплораспределения в тупиковых выработках можно разделить на два периода. Первый период с 30-х по 80-е годы XX века, где основные способы прогнозирования строились на эмпирических и аналитических методах. Данному периоду посвящен раздел 1.2.1

Второй период связан с появлением персональных компьютеров, бурным развитием вычислительной техники и новыми возможностями моделирования. Второму периоду посвящен раздел 1.2.2.

1.2.1 Аналитические методы

Первые попытки прогнозирования теплового режима в выработках предпринимались в 1930-е годы таким учеными как Б. Шточес и Б. Черник [69], F. Jansen [92], G. Jerpe [93], H. Fritzsche [90]. Предложенные методы базировались на предположении стационарности процесса теплопередачи через так называемую «тепловыравнивающую» рубашку, радиус которой равен области температурных возмущений в породном массиве от теплообмена с воздухом.

Для корректной оценки теплового режима в выработках в произвольный момент времени, требовалось учитывать процесс растепления породного массива (его постепенного охлаждения в процессе теплообмена с воздухом), в ходе которого тепловой поток от стенок выработки изменяется во времени. Для этого необходимо

применение дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процесс теплообмена между породой и рудничным воздухом, а в случае с тупиковыми выработками еще и с вентиляционным трубопроводом. Поэтому дальнейшее развитие пошло по пути составления и совершенствования данных уравнений.

Существенный прогресс в исследовании теплового режима был достигнут уже в послевоенные годы, в которые отметились такие исследователи как А. Ф. Воропаев [13, 10], К. В. Кочнев [33], А. Н. Щербань [72, 74, 79] и О. А. Кремнев [35, 34, 36]. Так в исследованиях Щербаня 50-х годов [74] была проведена серьезная работа по расчетам тепловых условий в вертикальных и горизонтальных сквозных горных выработках угольных шахт, в которых учитывалось изменение температуры поверхности стенки выработки во времени, изменение влажности воздуха, длина выработки, период проветривания выработки, тепловыделения от окисления окружающих пород, рост температуры пород с глубиной. Результаты решения полученных уравнений позволяли получить высокую сходимость с экспериментальными замерами в сквозных выработках. Эти же уравнения были предложены для определения температур в подготовительных выработках, однако они не учитывали особенностей формирования их теплового режима.

Для учета изменения теплового потока от стенок выработки в течение времени О. А. Кремневым вводится коэффициент нестационарного теплообмена k_τ , применение которого в расчетах в дальнейшем стало основным способом прогнозирования теплового режима в горных выработках. Коэффициент нестационарного теплообмена определяется по формуле:

$$k_\tau(t) = a \cdot \left(\frac{T_{ст}(t) - T_a}{T_m - T_a} \right),$$

где T_a — средняя в поперечном сечении выработки температура воздуха, °С; $T_{ст}(t)$ — температура на стенке выработки, °С; a — коэффициент теплоотдачи, Вт/м² · °С; T_m — температура «непотревоженного» массива, °С.

Для определения теплового потока между стенкой и воздухом в выработке применяется формула:

$$q = k_\tau (T_m - T_a).$$

С целью упрощения расчета, увеличения его точности и учета особенностей формирования теплового режима в различных условиях и на различных рудниках было выполнено множество работ различных авторов. Так в работе [77] учтено изменение относительной влажности в горных выработках, в работе А. Ф. Воропаева [11] для упрощения расчета коэффициента нестационарного теплообмена уравнения считались

сначала для плоской стенки, а затем переводились для цилиндрической поверхности, в работе С. Г. Гендлера вводятся поправки на форму сечения выработки, анизотропию окружающего породного массива, варианты расположения выработок относительно друг друга.

Разработанные методы прогнозирования теплового режима в рудниках в 50-60-е годы были «заточены» на определение температуры воздуха в уже построенных сквозных горных выработках. Более локальной проблемой прогнозирования теплового режима в тупиковых горных выработках на территории СНГ занимались такие ученые как А. Н. Ягельский [83, 82], А. Ф. Воропаев [12], А. Е. Величко [8], А. Н. Щербань, В. П. Черняка [74, 78], Н. А. Брайчева [7], Э. Н. Малашенко, Л. Б. Зимин [41], А. Ф. Галкин [15]. Необходимость разработки отдельной методологии прогнозирования теплораспределения в тупиковых выработках возникла в результате особенностей их проветривания.

Проветривание тупиковых выработок осуществляется с помощью нагнетательного способа. При нагнетательном способе воздух подается в забой выработки по вентиляционному трубопроводу, а удаляется через сечение выработки. Движение воздуха по вентиляционному трубопроводу и выработке осуществляется с помощью вентилятора местного проветривания. В результате теплообмена воздуха с окружающим породным массивом и ассимиляцией тепла от прочих тепловых источников возникает разница температур между воздухом внутри вентиляционного трубопровода и в выработке. Учитывая большую площадь вентиляционного трубопровода (которая может составлять несколько сотен квадратных метров), это приводит к значительному теплообмену между ними. Неучет данного фактора может привести к существенной ошибке при определении распределения температуры воздуха в выработке и как результат - к неправильным решениям по управлению микроклиматом в тупиковой выработке.

Так в работе А. Н. Щербаня и О. А. Кремнева [74] для прогнозирования теплового режима в тупиковых выработках предлагается использовать те же формулы, что и для сквозных. Это означает пренебрежение теплообменом между двумя потоками воздуха, разделёнными стенкой вентиляционного трубопровода, что приводит к существенной ошибке в результатах расчета.

Одним из первых, кто начал учитывать теплообмен между двумя потоками воздуха, стал А. Н. Ягельский [83, 82]. В его работах, помимо этого, так же учтены утечки воздуха в трубопроводе по длине и влагообмен с воздухом в выработке. Однако в данной работе допущена существенная ошибка при определении нагрева воздуха от работы

вентилятора. Так, нагрев воздуха от вентилятора учитывается дважды, первый раз от сжатия воздуха вентилятором, а второй – от силы трения при движении воздуха по вентиляционному трубопроводу, что является ошибкой. Воздух при движении по вентиляционному трубопроводу помимо нагрева от силы трения испытывает также и охлаждение от расширения. Эти две силы уравниваются друг друга, в результате чего температура воздуха по длине вентиляционного трубопровода при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой остается постоянной. Помимо этого, расчетные формулы получены не из дифференциальных уравнений теплового баланса, а из линейных уравнений. В результате прогноз с помощью данных уравнений способен давать достаточно точные результаты только при незначительных длинах тупиковых выработок. Еще одним недостатком является неучёт изменения температуры поверхности стенок выработки со временем.

В работе [75], в главе посвященной тепловому расчету тупиковых выработок, написанной Э. И. Баратовым, В. П. Черняком и Э. Н. Малашенко, приводятся расчетные зависимости, учитывающие изменение температуры поверхности стенок со временем с помощью коэффициента нестационарного теплообмена. Отдельно учитывается теплообмен в призабойном пространстве ввиду малого времени теплообмена воздуха со свежееголёнными породами. Представленные формулы позволяют определить температуры воздуха только в характерных точках (t_2 - t_5) тупиковой выработки (см. рисунок 1.1).

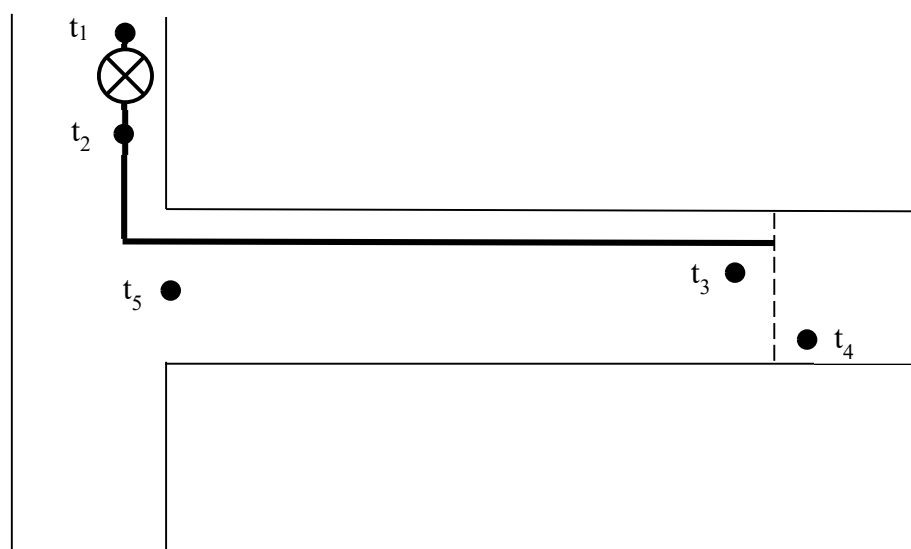


Рисунок 1.1 – Схема тупиковой выработки

В работе А. Ф. Воропаева [11] учтены недостатки методов предыдущих авторов. Расчетные формулы выведены на основе дифференциальных уравнений теплового баланса для воздуха в трубопроводе и в выработке. В работе рассмотрены две схемы

проветривания забоя выработки: нагнетательным способом и нагнетательно-всасывающим. При определении температуры воздуха в выработке применяется k_t . Полученные уравнения позволяют определить температуру воздуха в любой точке выработки и вентиляционного трубопровода.

В работе А. Н. Щербаня, О. А. Кремнева и В. Н. Журавленко [76] рассмотрен теплообмен в тупиковых выработках при всасывающем способе проветривания, а также при различных законах изменения влагосодержания в воздухе. Расчетные формулы стали позволять оценивать влияние воздухоохладителей на формирование температурных условий в тупиковых выработках. В данной работе обращено внимание на влияние лучистого теплообмена и приведена формула определения теплового потока между стенкой выработки и воздухом выработки:

$$q = \varepsilon'_w \cdot C_0 \cdot \varepsilon_g \cdot \left[\left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 \right],$$

где $\varepsilon'_w = (\varepsilon_w + 1)/2$ – эффективная степень черноты стенки выработки; ε_w – действительная степень черноты стенки выработки; C_0 – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, $C_0 = 4,9$ ккал/(ч · м² · К⁴); $\varepsilon_g = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}$ – степень черноты смеси углекислого газа и водяных паров при температуре рудничного воздуха; $T_{ст}$ – абсолютная температура стенки горной выработки, К; T_g – абсолютная температура газа; К.

В работе А. Ф. Воропаева [14] лучистый теплообмен, напротив, учитывается только между воздухом в выработке и поверхностью вентиляционного трубопровода.

В работе А. Ф. Галкина [15], посвященной проблеме прогнозирования теплового режима в зоне многолетнемерзлых пород, лучистый теплообмен рассмотрен между поверхностью вентиляционного трубопровода и поверхностью выработки. Для упрощения формула расчета теплового потока лучистым теплообменом с разницей температур поверхностей в четвертой степени изменена с вида:

$$q = \varepsilon \cdot C_0 \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

до выражения:

$$q = \alpha_p \cdot (t_2 - t_1),$$

где ε – приведенная степень черноты; T_1 и T_2 – температура поверхности вентиляционного трубопровода и выработки; α_p – коэффициент теплоотдачи излучения, который определяется путем введения коэффициента линеаризации [44] и определяется по формуле:

$$\alpha_p = k \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot T_{cp}^3,$$

где k – коэффициент линеаризации; $T_{cp} = (T_1 + T_2)/2$.

Коэффициент линеаризации определяется по формуле:

$$k = \frac{(t_2 + 273)^4 - (t_1 + 273)^4}{[273 + 0,5 \cdot (t_1 + t_2)]^3 \cdot (t_2 - t_1)}.$$

Для расчета температуры поверхности выработки применяется формула предложенная в [75] и использующая коэффициент нестационарного теплообмена.

Проанализированные методики теплового расчета имеют ограниченную область применения и недостаточную точность. Численные методы, рассмотренные далее, позволяют улучшить точность расчета и расширить область применения.

1.2.2 Численные методы

Прогнозированию тепловых условий в тупиковых выработках при помощи численных методов посвящены работы Jordan D.W. [94], Черняка В.П. [68], Хохолова Ю.А. и Соловьева Д.Е. [65].

В работе Д. Е. Соловьева [59], представлена тепловая модель тупиковой выработки, использующая метод конечных разностей. Данная модель имеет ряд особенностей. За основу была взята модель, разработанная для прогнозирования теплораспределения в вентиляционной сети рудников, расположенных в криолитозоне. Особенность данных рудников заключается в том, что при теплообмене пород с воздухом происходит фазовый переход воды в породе, в результате чего выделяется (а в некоторых случаях поглощается) тепловая энергия. В результате была построена двумерная сопряженная тепловая модель выработки, учитывающая фазовые переходы воды в окружающем породном массиве. Модель позволяет определять температуру воздуха и породного массива в любой точке пространства.

Для прогнозирования теплораспределения в тупиковых выработках модель учитывает теплообмен воздуха в выработке с вентиляционным трубопроводом, ежесуточное оголение породного массива при проходке выработки (имеющего температуру нетронутых пород), источники тепловыделения в выработке и утечки воздуха из трубопровода. Основные уравнения теплового баланса для воздуха в выработке и вентиляционного трубопровода имеют вид:

$$C_6 \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = \frac{2\alpha_1}{R_1} (T_2 - T_1), \quad 0 < x \leq L,$$

$$C_6 \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} - v_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = \frac{2R_1\alpha_1}{(R_2^2 - R_1^2)} (T_2 - T_1) + \frac{2R_2\alpha_2}{(R_2^2 - R_1^2)} (T_2 - T_{cm}), \quad 0 \leq x < L,$$

где T_1 и T_2 – соответственно температура воздуха в трубопроводе и выработке, °С; C_e – объемная эффективная теплоемкость влажного воздуха, Дж/(м³·К); t – время, с; x – продольная координата, м; R_1 и R_2 соответственно радиус трубопровода и выработки, м; α_1 – коэффициент теплопередачи от воздуха внутри трубопровода к рудничному воздуху через его стенку, Вт/(м²·К); v_1 и v_2 – соответственно скорость воздуха в трубопроводе и выработке, м/с; α_2 – коэффициент теплообмена между рудничным воздухом и стенками выработки, Вт/(м²·К); T_{cm} – температура стенки выработки, °С.

Процесс распространения тепла в породном массиве описывается следующим уравнением:

$$\left[C(T) + L_\phi \cdot \omega \cdot \rho \cdot \delta(T - T^*) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left[\lambda(T) \cdot R \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right],$$

где c_1 , ρ_1 , λ_1 (c_2 , ρ_2 , λ_2) – удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м³) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород; L_ϕ – скрытая теплота фазовых переходов, Дж/кг; ω – весовая влажность пород (в долях единицы); T^* – температура фазовых переходов, °С; $\delta(T - T^*)$ – дельта-функция Дирака

На сегодняшний день для прогнозного моделирования теплового режима в выработках используются различные программные продукты такие как Climsim [115, 106], Ansys Fluent [88, 107], COMSOL Multiphysicals [100], которые позволяют решать широкий спектр задач гидродинамики, однако они не позволяют учесть ряд особенностей формирования микроклимата в выработках и требуют большого объема ввода исходных данных для получения результатов, что осложняет работу с ними.

1.3 Способы управления тепловым режимом в тупиковых выработках

Целью управления тепловым режимом является обеспечение в рабочей зоне температуры воздуха в допустимом диапазоне. Верхним значением в Российской Федерации является температура 26 °С [64]. Рабочей зоной в рудниках принято считать участок горной выработки, включающий места постоянного пребывания горнорабочих. Для тупиковой горной выработки это призабойный участок, ограниченный с одной стороны забоем, а с другой концом вентиляционного трубопровода.

Способы управления тепловым режимом в выработках обычно делятся на две группы по критерию неприменения или применения средств охлаждения воздуха [4]. Первая группа называется горнотехнической, способы которой позволяют снижать температуру воздуха в рабочих зонах без средств охлаждения, а вторая теплотехнической – использующей средства охлаждения [17, 70, 61, 71, 31, 43].

Основной задачей горнотехнических методов является снижение интенсивности теплообмена рудничного воздуха с окружающим породным массивом, а в случае тупиковых выработок - снижение интенсивности нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе, в результате чего в рабочих зонах достигаются требуемые значения температуры. Решается данная задача с помощью различных технических решений и мероприятий, таких как изменение вентиляционных режимов, выбор оптимальных параметров выработки и вентиляционного трубопровода, применение теплоизоляции, обособленное проветривание источников тепловыделения, сокращение пути свежей струи и др. [72, 73, 4, 16].

Теплотехнические методы применяются в только в том случае, когда горнотехническими методами достигнуть необходимой температуры воздуха в рабочей зоне не удалось. Это связано с тем, что применение теплотехнических способов связано с большими капитальными и эксплуатационными затратами, чем у горнотехнических методов. Они позволяют регулировать параметры воздуха в широком диапазоне как по температуре, так и по влажности с помощью тепломассообменных аппаратов. Охлаждение воздуха может достигаться как энергетическими способами, так без них. К первым относятся способы, использующие тепловую или электрическую энергию для получения холода. Вторые способы используют природные источники холода или охлаждение испарением.

Наибольшего эффекта охлаждения возможно достичь при комбинированном использовании горнотехнических и теплотехнических способов снижения температуры в рабочих зонах.

1.3.1 Горнотехнические способы управления тепловым режимом в тупиковых выработках

Горнотехнические способы регулирования при решении задачи снижения температуры воздуха в рабочих зонах направлены на снижение интенсивности нагрева воздуха по пути от поверхности до рабочих зон. Обзору горнотехнических способов для сквозных выработок посвящена работа А. В. Зайцева [23]. Горнотехнические способы управления тепловым режимом в тупиковых выработках схожи с аналогичными способами для сквозных выработок. К схожим способам можно отнести: изменение объема подачи воздуха; снижение интенсивности теплообмена с породным массивом; уменьшение тепловыделения от окислительных процессов; снижение тепловыделений от местных источников тепла. Однако, ввиду наличия особенностей проветривания тупиковых выработок, в них также могут применяться и другие способы: снижение

интенсивности нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе и снижение сопротивления вентиляционного трубопровода.

В тупиковых выработках при нагнетательном способе проветривания увеличение объема подачи необязательно будет приводить к снижению температуры воздуха в рабочей зоне. Это связано с тем, что при постоянном сечении вентиляционного трубопровода увеличение объема подачи воздуха приведет к дополнительному нагреву на вентиляторе, значение которого может превышать эффект от снижения интенсивности нагрева воздуха при движении по вентиляционному трубопроводу. Значение нагрева воздуха на вентиляторе может быть определено по формуле:

$$\Delta T_{\text{ВМП}} = \frac{R \cdot Q^2}{\eta \cdot \rho \cdot c},$$

где R – коэффициент сопротивления сети, $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8$; Q – расход воздуха на вентиляторе, $\text{м}^3 / \text{с}$; η – КПД рабочего колеса и электродвигателя вентилятора; ρ – плотность воздуха, $\text{кг} / \text{м}^3$; c – теплоемкость воздуха, $\text{Дж} / \text{кг} \cdot ^\circ\text{С}$.

Снижение интенсивности теплообмена с породным массивом достигается с помощью наращивания термического сопротивления на разделе двух фаз применением крепи, имеющей теплоизоляционные свойства, или теплоизоляции [9].

Существенное влияние на температуру воздуха может оказывать окисление окружающих пород и их пыль [11, 46, 48]. Нагрев воздуха от окислительных процессов происходит двумя основными путями: при контакте воздуха с со стенками окисляемых пород происходит их окисление, в результате чего температура пород увеличивается, что приводит к увеличению температуры воздуха и интенсификации его нагрева; при наличие окисляемой пыли в воздухе в виду большой площади контакта происходит интенсивный процесс окисления, который приводит к нагреву воздуха от пыли. Для борьбы с окислительными процессами применяют специальные антиокислительные вещества, которыми покрывают поверхности выработок, а для борьбы с пылью часто применяют водяные завесы.

Основными источниками тепловыделений в тупиковых выработках является техника с ДВС, комбайны [47] и вентиляторы местного проветривания. Наиболее эффективным способом борьбы с тепловыделениями от техники с ДВС является ее замена на технику с электродвигателями. Электродвигатели имеют КПД в два-три раза выше, чем у ДВС, что приводит к существенному снижению тепловыделений. Для снижения тепловыделений от ВМП необходимо снизить сопротивление сети. Наиболее простой способ достичь этого – увеличение диаметра вентиляционного трубопровода.

Считается, что основной нагрев воздуха в вентиляционном трубопроводе происходит в результате конвективного теплообмена через стенку трубопровода между потоками воздуха в выработке и в трубопроводе. Для снижения интенсивности теплообмена применяются теплоизолированные трубопроводы.

Основным недостатком горнотехнических способов является то, что они зависят от наличия холодного воздуха, и в случае его отсутствия их применение становится бессмысленным без применения теплотехнических способов.

1.3.2 Теплотехнические способы управления тепловым режимом в тупиковых выработках

Теплотехнические способы управления требуют подведения и использования различных энергетических ресурсов. В качестве таких ресурсов обычно выступают электричество или вода. Для их использования с целью охлаждения необходимо применение сложных технических устройств, таких как насосы, компрессоры, теплообменники и др., эксплуатация которых также требует высококвалифицированного обслуживающего персонала.

Наиболее простым и не требующим больших эксплуатационных затрат теплотехническим способом снижения температуры воздуха является применение камер орошения. Камера состоит из корпуса, внутри которого расположены форсунки, распыляющие воду в потоке охлаждаемого воздуха, каплеуловитель и поддон, в который стекают излишки воды. При подаче воздуха через камеру, распыленная вода начинает испаряться и за счет этого охлаждаться, одновременно охлаждая и увлажняя воздух.

Эффективность способа зависит от относительной влажности воздуха и барометрического давления. Чем выше барометрическое давление и выше относительная влажность воздуха, тем ниже эффективность, и наоборот, чем ниже барометрическое давление и ниже относительная влажность, тем выше эффективность камер орошения. Таким образом, если воздух подается с поверхности, эффективность камер орошения в летний период будет ниже, чем в зимний, т. к. летом воздух значительно более влажный, чем зимой. Также эффективность камер орошения будет выше при применении всасывающего способа проветривания, т. к. шахта будет находиться под разрежением и давление воздуха будет ниже, чем при нагнетательном способе. Современные камеры орошения позволяют увлажнить воздух до состояния, когда его относительная влажность будет составлять 85 — 95 %.

Эффективность охлаждения данного способа легко определить при известном значении температуры, относительной влажности и барометрического давления охлаждаемого воздуха с помощью i-d диаграммы для соответствующего давления. Для

этого необходимо по линии постоянной энтальпии провести линию от точки с температурой и относительной влажностью, соответствующей воздуху перед камерой орошения, до точки со значением относительной влажности 85 — 95 %. (см. рисунок 1.2). Так при прохождении через камеру орошения воздуха с температурой 35 °С, относительной влажностью 30 % и при барометрическом давлении 115 кПа (точка 1) на выходе из нее можно получить воздух с температурой 23 °С и относительной влажностью 90 % (точка 2).

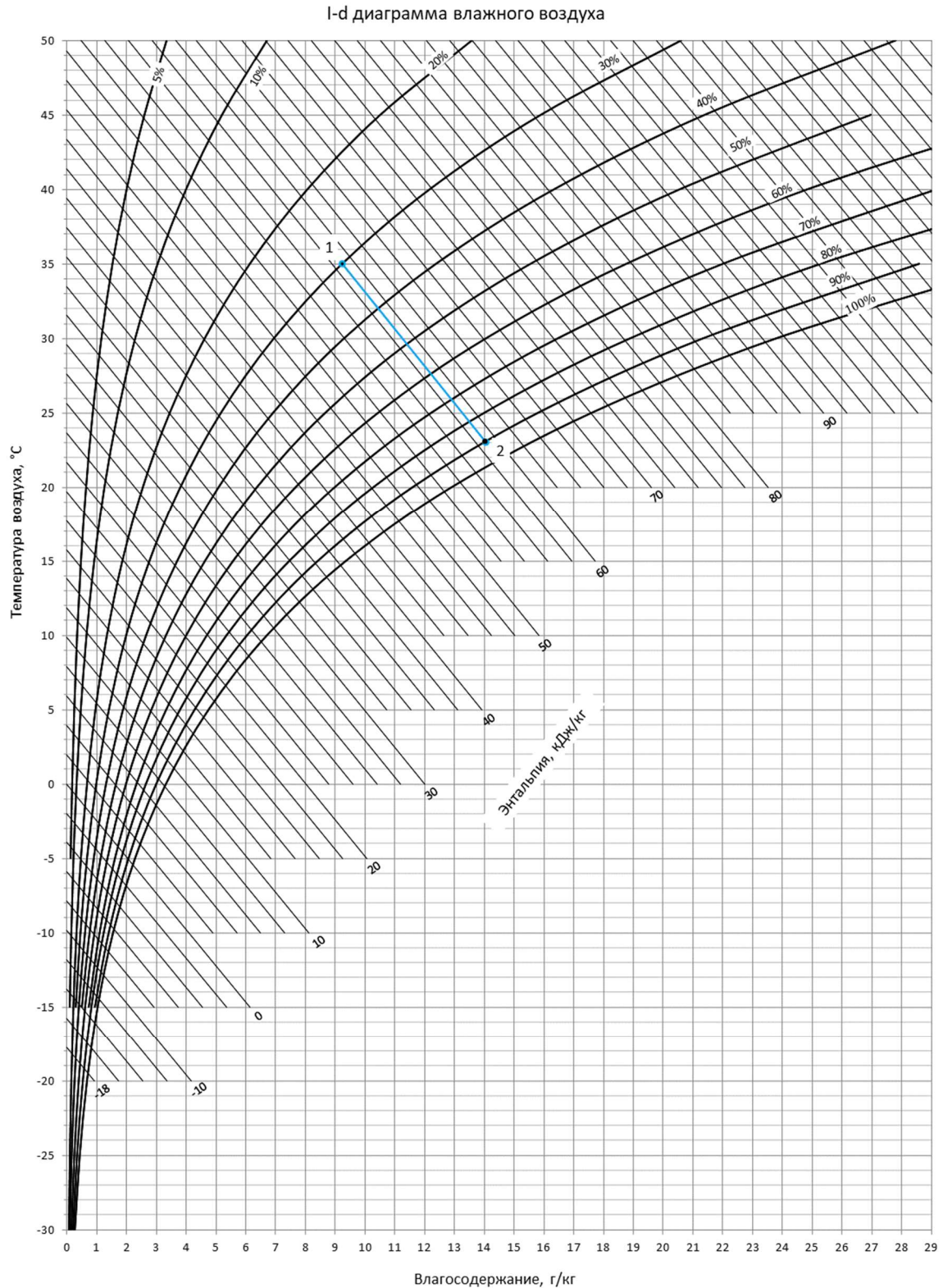


Рисунок 1.2 – i-d диаграмма для давления 115 кПа

Согласно исследованиям Sureshkumar [109], таким способом возможно достичь охлаждения воздуха до 14 °C. Существенными недостатками данного способа являются ограниченная область применения (в рудниках с сухим воздухом и нерастворимыми породами) и снижение эффективности в летний период. Поэтому этот способ не нашел

широкого распространения [117] и ограниченно применяется при строительстве глубоких рудников в момент, когда воздух с поверхности подается по трубопроводам без контакта с водой, и на угольных шахтах в составе системы пылеподавления.

Более сложным, дорогим, но универсальным способом является охлаждение воздуха с помощью холодильных машин. Существуют два основных типа холодильных машин, это парокompрессионные (ПКХМ) и абсорбционные холодильные машины (АБХМ). Системы кондиционирования воздуха на основе парокompрессионных холодильных машин имеют высокое значение коэффициента энергетической эффективности EER (Energy Efficiency Ratio – коэффициент, показывающий соотношение мощности охлаждения к потребляемой), который находится в диапазоне 2,5 - 3,5. Для работы данных систем необходимо подведение электричества, либо механической силы для вращения вала компрессора. Системы кондиционирования на основе абсорбционных холодильных машин имеют EER на уровне 0,65 - 1,52. В их конструкции отсутствует дорогостоящий компрессор, а для их работы необходим источник тепла.

Наиболее часто АБХМ используют на производствах, где имеется «отбросное» тепло [66] с температурой греющего тела не менее 75 °С или имеется другой источник дешевого тепла. Примером использования АБХМ являются угольные шахты Донбасса [2]. Так на угольной шахте им. А. Ф. Засядько принято решение строительства поверхностной АБХМ с мощностью охлаждения 9 МВт, работающей на дегазационном метане [3].

Охлаждение воздуха происходит на воздухоохладителях, в которые через систему трубопроводов подается охлажденная вода от холодильных машин. По месту расположения воздухоохладителей и организации их холодоснабжения холодильными машинами можно поделить системы на централизованные, полуцентрализованные и местные [67]. Централизованные системы в свою очередь делятся по типу размещения их элементов: градирня, ХМ и ВО располагаются на поверхности; градирня и ХМ располагаются на поверхности [118], а ВО под землёй; градирня располагается либо под землей, либо на поверхности, а ХМ и ВО располагаются под землей [11]. Для данной работы интерес представляют местные воздухоохладители, источником холода для которых могут быть как местные, так и центральные ХМ.

В качестве теплоносителя также может применяться бинарный лед, который представляет из себя смесь воды и мелкофракционного льда (не более 450 мкм) с соотношением льда и воды 75/25. Для этого дополнительно устанавливаются генераторы льда, которые также представляют из себя парокompрессионные машины с различными

технологиями получения льда (скребковые, с непосредственным смешением водяных паров с холодильными агентами, вакуумные и др. типы ледогенераторов). Это позволяет снизить объем подаваемого теплоносителя в шахту и увеличить расстояние, на котором можно размещать воздухоохладители от ХМ.

Впервые парокомпрессионные машины были применены на шахте Морро-Велью в Бразилии в 1923 г. и велись экспериментальные работы в британских угольных шахтах Хэнкок в 1926 г. [102]. В 1930-х ПКХМ получили дальнейшее развитие на золотых рудниках ЮАР и Индии. В 1980-х в шахтах Донбасса суммарная холодопроизводительность установок составляла 150 МВт, в ЮАР – 350 МВт, в ФРГ – 150 МВт [62]. А к 2000-м годам в только в ЮАР суммарная холодопроизводительность установок достигла 1,4 ГВт [110].

Помимо получения охлажденной воды с помощью холодильных установок в некоторых случаях возможно применение природных источников холода. Таким примером являются проекты охлаждения шахтного воздуха с помощью глубинных вод озер в Канаде, имеющих постоянную температуру около 5 °С [97]. При условии достаточного размера озера и близости рудника к нему, данные способы позволяют существенно экономить на получении охлаждённого воздуха по сравнению с применением холодильных машин.

Однако увеличение стоимости энергоресурсов и изменение экономических условий привело к сокращению использования систем кондиционирования воздуха. Так на угольных шахтах Донбасса в 2000-х годах из парка холодильных машин суммарной мощностью 207 МВт, работающей оставалась только одна холодильная машина [2], и до сегодняшнего дня применение СКВ имеет эпизодический характер. В связи с этим существует потребность совершенствования методик и способов управления тепловым режимом в тупиковых выработках глубоких рудников, которые позволят снизить требуемую холодильную мощность местных воздухоохладителей и сделать применение рудничных СКВ более рентабельным.

1.4 Методы расчета систем кондиционирования воздуха для тупиковых выработок

Расчету систем кондиционирования непосредственно в тупиковых выработках уделено достаточно мало внимания. В работе [76] основной фокус внимания сосредоточен на охлаждении лав и шахты в целом. Проблематике расчета систем кондиционирования уделена небольшая часть, но она позволяет определить требуемую холодильную мощность СКВ. Для определения требуемой холодопроизводительности дана формула:

$$Q_x = G \cdot (I_1 - I_2) + \sum K_x \cdot F \cdot \Delta t_{cp},$$

где G – количество воздуха, охлаждаемого в воздухоохладителе, кг/с; I_1 и I_2 – начальная и конечная энтальпия охлаждаемого в воздухоохладителе воздуха, кДж/кг; K_x – коэффициент теплопередачи к охлаждающим циркуляционным трубопроводам, определяется с учетом диффузии и конденсации водяных паров; F – площадь поверхности трубопровода; м²; Δt_{cp} – средний температурный напор между воздухом и холодной водой.

Особую важность в расчете конечной мощности СКВ является определение конечной энтальпии (I_2), которая, в свою очередь, зависит от необходимой температуры после воздухоохладителя. Представленная методика предлагает для определения данной температуры использовать метод обратного теплового расчета. Сутью этого метода является принятие в характерной точке необходимой температуры воздуха (температура на выходе из забоя выработки), и путем расчета температур в обратном порядке найти температуру воздуха после воздухоохладителя.

Это позволяет определить значение температуры на расчётный период существования выработки из условия проветривания выработки вентиляционной струей только с охлаждением. Такой подход приводит к получению требуемой холодопроизводительности СКВ без запаса мощности, что приводит к невозможности обеспечения требуемой температуры воздуха в рабочей зоне в случае начала работы СКВ не одновременно с началом строительства тупиковой выработки. Кроме того, методика не предусматривает возможности выхода расчётных значений температуры воздуха за технологические пределы охлаждения с помощью воздухоохладителей (не менее 3 °С для фреоновых ВО и не менее 6 °С для водяных ВО), а так же расчёта систем кондиционирования с использованием теплоизолированных трубопроводов.

На текущий момент основным инструментом тепловых расчетов и управления тепловым режимом в тупиковых выработках для проектировщиков является стандарт "Прогнозирование и нормализация тепловых условий в угольных шахтах" [55], который является обновленной версией [20]. Эти методики базируются на полуэмпирических методах решения и имеют схожие недостатки с [76].

Таким образом, требуется разработать методику, позволяющую рассчитывать необходимую холодопроизводительность в тупиковых выработках в зависимости от времени начала работы СКВ, а также определять толщину теплоизоляции вентиляционных трубопроводов.

1.5 Цель и задачи исследования

На основе проведенного литературного анализа была сформулирована следующая цель работы - обосновать методику подбора местных систем управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках в условиях высокой температуры окружающего породного массива.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА В ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

В настоящее время многие горнодобывающие предприятия для поддержания и увеличения своих производственных мощностей вынуждены вовлекать в отработку все более глубокие залежи полезных ископаемых, использовать более высокопроизводительную технику. По мере увеличения глубины ведения горных работ температуры окружающих пород растут. В этих условиях микроклиматические параметры в рабочих зонах шахт и рудников приближаются к своим предельно-допустимым значениям и начинают превышать их, что является недопустимым с точки зрения правил безопасности. Нормализовать температуру воздуха по всей длине протяженной тупиковой выработки на большой глубине зачастую невозможно, т. к. для этого необходима подача в забой воздуха с слишком низкой температурой, что, в свою очередь, требует огромных холодильных мощностей. Поэтому, необходимо решать задачу локального охлаждения воздуха в рабочих зонах.

Основной проблемой для определения холодопроизводительности воздухоохладителей, являются исходные данные для расчета, а именно температура воздуха, до и после воздухоохладителя. Для их определения применяются методики, которые опираются на полуэмпирический коэффициент теплоотдачи, что приводит к снижению точности расчётов и как следствие неверному определению требуемой холодопроизводительности, которое зачастую имеет заниженные значения. Для решения этой проблемы в данной главе предложена математическая модель теплообмена в тупиковой горной выработке учитывающая теплообмен в системе «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода – воздух в вентиляционном трубопроводе».

Для получения адекватных результатов в модели необходимо учесть все основные факторы, которые могут влиять на микроклиматические параметры воздуха. К таким факторам можно отнести:

- конвективный теплообмен воздуха;
- лучистый теплообмен между вентиляционным трубопроводом и поверхностью выработки;
- изменение температуры породного массива во времени;
- тепловыделения от работающей горной техники – самосвалов, погрузочно-доставочных машин и т. п.;
- тепловыделения от электрооборудования (ВМП, трансформаторы и т. п.);

- гидростатический нагрев/охлаждение воздуха при движении по наклонным выработкам;
- движение забоя выработки;
- влагообмен;
- повышенный коэффициент теплообмена в призабойном пространстве.

Исследование процессов формирования микроклимата глубоких рудников следует начать с рассмотрения тепловых процессов, происходящих в тупиковых горных выработках, проветриваемых с помощью вентиляционного трубопровода, как наиболее сложной системы, а при рассмотрении сквозных выработок лишние процессы убрать из системы.

Особенностью формирования микроклимата в проветриваемой тупиковой горной выработке является теплообмен с вентиляционным трубопроводом, который существенно усложняет расчет. При учете влияния вентиляционного трубопровода на микроклиматические параметры воздуха в выработке следует учитывать не только конвективный теплообмен между вентиляционным трубопроводом и воздухом в выработке, но и лучистый теплообмен между вентиляционным трубопроводом и стенками выработки.

Для построения модели сопряженного теплообмена необходимо составить систему уравнений, учитывающих все основные факторы, способные влиять на температуру.

2.1 Экспериментальные исследования процессов формирования микроклимата в тупиковых горных выработках

Необходимость исследования процессов формирования микроклиматических условий в выработках с вентиляционными трубопроводами возникла в результате опыта эксплуатации системы кондиционирования на Гремячинском ГОКе ООО «Еврохим-ВолгаКалий».

В период эксплуатации системы были проведены инструментальные исследования микроклиматических параметров воздуха в следующих местах тупиковой выработки (см. таблицу 2.1):

- на входе в воздухоохладитель (точка 1);
- на выходе из воздухоохладителя (точка 2);
- на выходе из вентиляционного трубопровода у места работы машиниста (точка 3);

- в призабойном пространстве комбайнового комплекса на расстоянии 30 метров от забоя (точка 4);
- в устье охлаждаемой тупиковой выработки (точка 5);
- в проходческом штреке до места установки градирни (точка 6);
- в проходческом штреке на выходе из вентиляционного трубопровода градирни (точка 7);
- в проходческом штреке на расстоянии 200 метров от сбойки с СКВ (точка 8).

Схема системы кондиционирования воздуха и места проведения инструментального исследования представлены на рисунке 2.1.

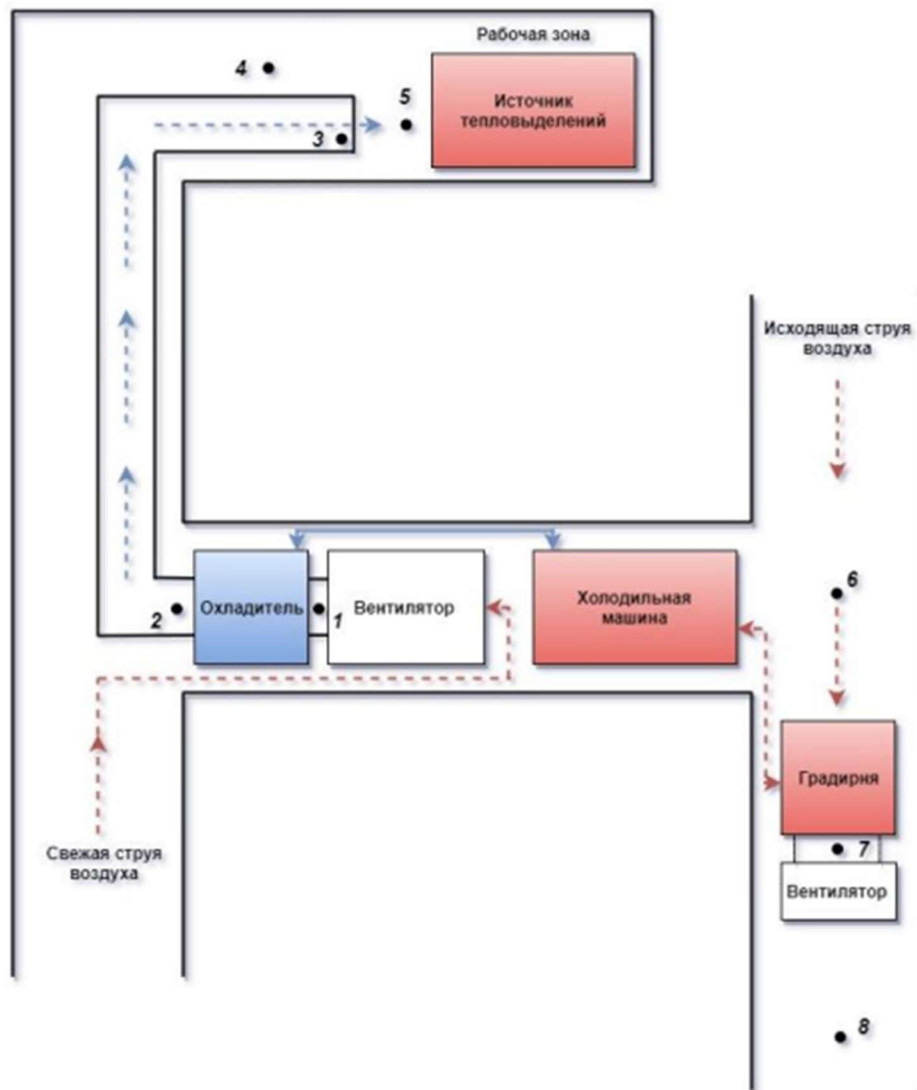


Рисунок 2.1 – Схема системы кондиционирования и места проведения замеров
 Результаты инструментального исследования микроклиматических параметров воздуха сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты инструментального исследования микроклиматических параметров воздуха в тупиковой выработке

		Параметр	Точка							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Добычная	Без СКВ	Температура, °С	-	-	35,8	38,4	37,1	34,8	-	34,5
		Относительная влажность, %	-	-	30,9	28,7	28,8	34,3	-	35,2
		Расход воздуха, м ³ /с	-	-	-	4,4	-	34,7	-	-
	С СКВ	Температура, °С	29,6	16,3	30,9	35,6	36,2	34,4	57,5	38,3
		Относительная влажность, %	47	72,5	32,6	31,4	30,5	34,8	14,8	29,5
		Расход воздуха, м ³ /с	5,8	-	-	4,4	-	34,7	7,3	-

В результате инструментального исследования было установлено, что несмотря на работу системы кондиционирования воздуха в заданных параметрах, температуру воздуха в забое снизить до требуемых значений не удалось, т.к. воздух в вентиляционном трубопроводе интенсивно нагревался. Поэтому были проведены дополнительные замеры температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода (см. таблицу 2.2):

Таблица 2.2 – Интенсивность нагрева охлажденного воздуха в вентиляционном трубопроводе

Расстояние, м	0	70	120	170	230	280	330
Температура, °С	16,3	19,7	20,8	24	26,2	28,2	29,5

Для определения причин интенсивного нагрева воздуха и путей решения проблемы, полученные экспериментальные данные сравнивались с результатами модели конвективного теплообмена, состоящей из следующих основных уравнений:

теплоперенос внутри вентиляционного трубопровода:

$$G_1 \cdot c \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} = (T_2 - T_1) \cdot k \cdot \pi, \quad (2.1)$$

где T_1 – температура воздуха внутри вентиляционного трубопровода, °С; T_2 – температура воздуха в выработке, °С; c – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); G_1 – массовый расход воздуха внутри вентиляционного трубопровода, кг/с; k – коэффициент теплопередачи через стенку трубопровода, определяется по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_{in}d_{in}} + \frac{1}{2\lambda_w \ln \frac{d_{out}}{d_{in}}} + \frac{1}{a_{out}d_{out}}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С}), \quad (2.2)$$

где a_{in} – коэффициент теплоотдачи воздуха в пограничном слое на внутренней стенке вентиляционного трубопровода, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$; d_{in} – внутренний диаметр вентиляционного трубопровода, м; λ_w – коэффициент теплопроводности стенки вентиляционного трубопровода, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$; d_{out} – внешний диаметр вентиляционного трубопровода, м; a_{out} – коэффициент теплоотдачи воздуха в пограничном слое на внутренней стенке вентиляционного трубопровода, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$;

Коэффициенты теплоотдачи a_{in} и a_{out} определялись по формулам для гладких труб [44]. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.2.

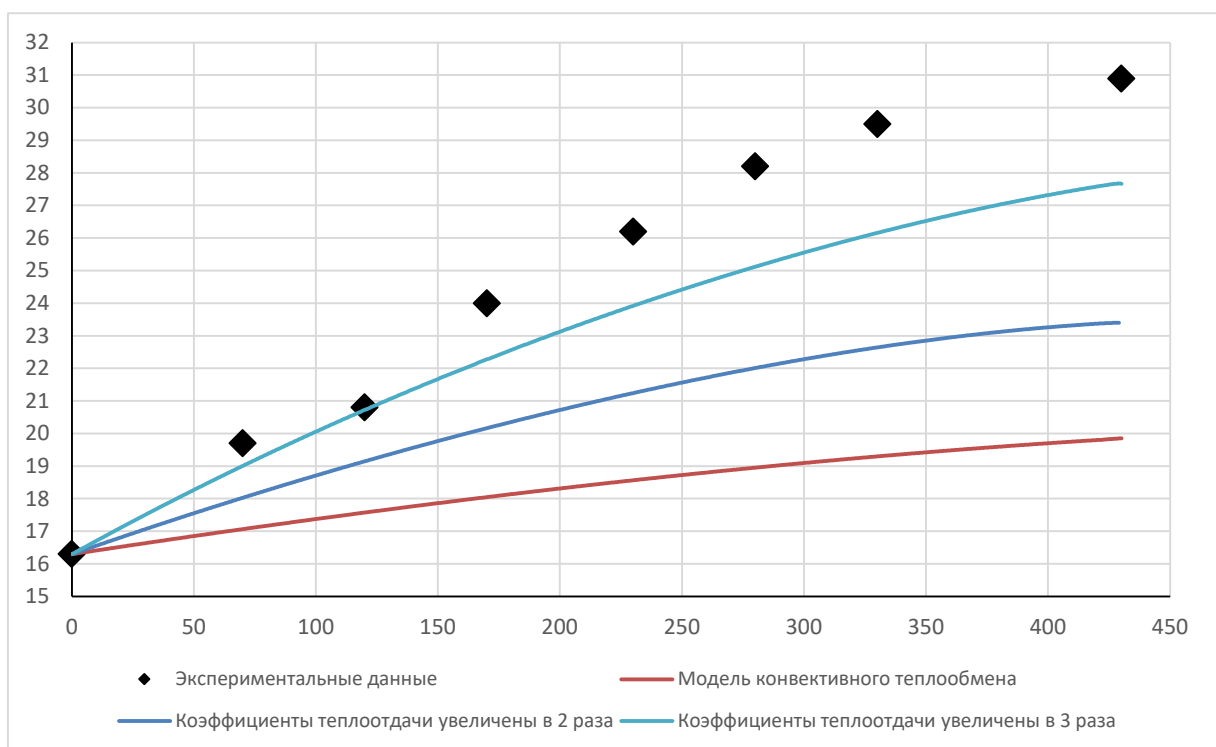


Рисунок 2.2 – График роста температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода

Полученные результаты показывают, что фактически нагрев в вентиляционном трубопроводе происходит значительно интенсивнее, чем показывает модель конвективного теплообмена, во всех возможных диапазонах коэффициента теплоотдачи a_{in} и a_{out} . Коэффициент теплоотдачи, согласно [80], может превышать значение теплоотдачи для гладких труб в три раза из-за влияния шероховатости стенок, которая может возникнуть в результате перекручивания вентиляционного трубопровода, влияние крепления и поворотов. Поэтому была выдвинута гипотеза о том, что при моделировании распределения температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе

необходимо учитывать дополнительный механизм теплообмена – лучистый теплообмен, влиянием которого пренебрегают.

Согласно закону Стефана – Больцмана тепловой поток между телами от лучистого теплообмена в замкнутом пространстве зависит от разницы температур между поверхностями тел в четвертой степени.

$$w = \varepsilon_{\text{п}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \quad (2.3)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ – приведенная степень черноты; $C_0 = 5,67$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_1 и T_2 – температура поверхности выработки и вентиляционного трубопровода, °С; F – площадь трубопровода, м².

Поскольку вентиляционный трубопровод находится в среде, где температура окружающего массива достаточно высока, а его поверхность имеет низкую температуру, то тепловой поток между ними может достигать существенных величин, поэтому в качестве наиболее вероятного фактора стал рассматриваться лучистый теплообмен.

Для оценки степени влияния этого эффекта было проведено моделирование с учетом лучистого теплообмена и построен график температур (см. рисунок 2.3). Средняя температура поверхности выработки согласно результатам замеров составила 38,0 °С.

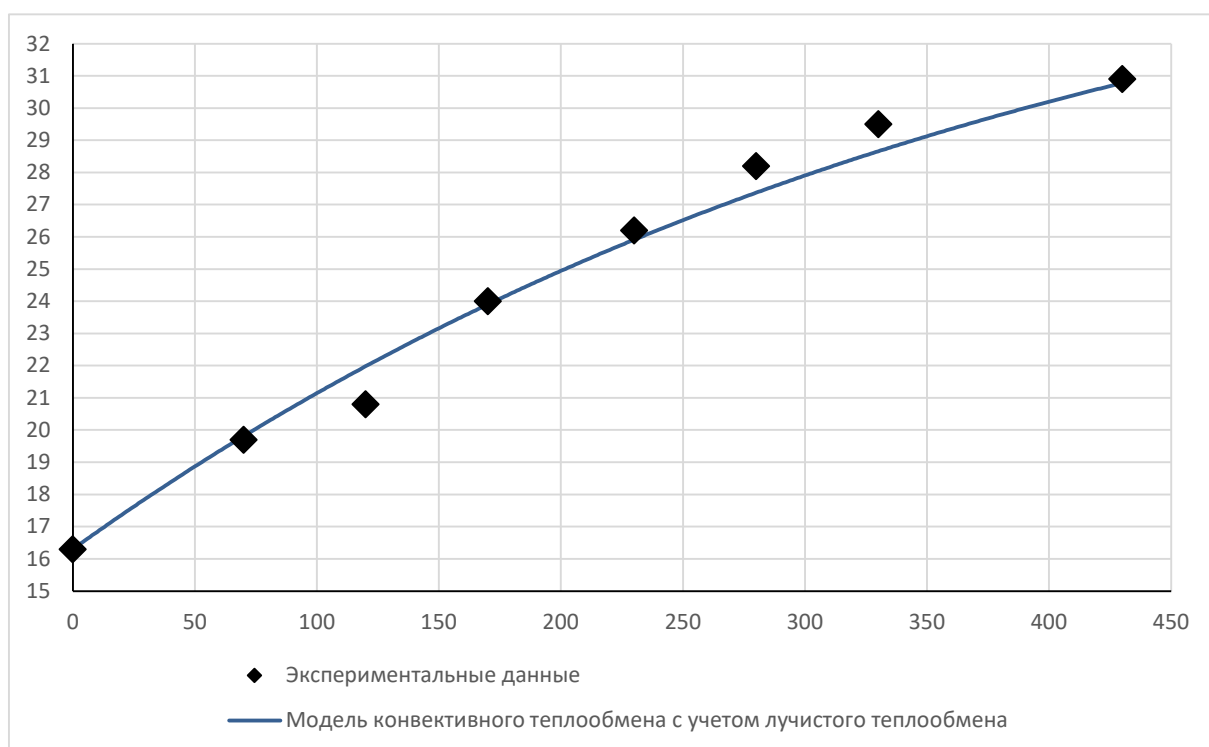


Рисунок 2.3 – Результаты моделирования с учетом лучистого теплообмена

Как видно из графика, модельное распределение температур воздуха в вентиляционном трубопроводе, учитывающее лучистый теплообмен, показывает результаты, схожие с данными эксперимента. Для этого были подобраны степени

черноты для поверхности трубопровода (0,945 для резины) и выработки (0,96 для сильвинита [99]), а также увеличен коэффициент теплоотдачи в 1,4 раза, что вписывается в диапазон допустимых значений поправочного коэффициента [80]. 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, что при проектировании шахтных СКВ и моделировании теплового режима тупиковых выработок необходимо учитывать лучистый теплообмен.

При моделировании теплораспределения в рудниках принимается допущение, что рудничная атмосфера является полностью прозрачной для теплового излучения. В действительности же, трехатомные газы, содержащиеся в атмосферном воздухе, не являются прозрачными для теплового излучения. К таким газам можно отнести CO_2 и H_2O . Водяные пары (H_2O) могут находиться в составе воздуха в значительных количествах для лучистого теплообмена количествах. Влияние лучистого теплообмена между воздухом и поверхностью выработки учитывалось в работе [76]. В работе [14] лучистый теплообмен учитывался между воздухом и поверхностью вентиляционного трубопровода.

Для оценки поглощательной способности водяных паров в рудничной атмосфере можно воспользоваться формулой [76]:

$$\alpha_{wv} = c_{\text{H}_2\text{O}} \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \left(\frac{T_{\text{H}_2\text{O}}}{T_s} \right)^{0.45}, \quad (2.4)$$

где $c_{\text{H}_2\text{O}}$ – поправочный коэффициент при отличном от атмосферного давления воздуха; $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ – излучательная способность водяного пара, которая зависит от парциального давления водяных паров в воздухе и длины пути луча; T_s – температура излучающей поверхности; $T_{\text{H}_2\text{O}}$ – температура водяного пара.

Так при параметрах $c_{\text{H}_2\text{O}}$ и $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$, рассчитанных для условий атмосферного давления, парциального давления водяных паров 1800 Па (что соответствует относительной влажности 32% при температуре воздуха 35 °С) и средней длины пути луча 2,1 м, температуре излучающей стенки T_s - 38°С и температуре водяного пара $T_{\text{H}_2\text{O}}$ - 35°С, воздух будет поглощать около 10 % теплового излучения, проходящего через него, что при наличии собственного теплового излучения, подразумевает его незначительное влияние на радиационный теплообмен между вентиляционным трубопроводом и породным массивом. Полученный результат позволяет пренебрегать данным фактором при моделировании теплораспределения в условиях большинства тупиковых выработок, однако при более высокой влажности воздуха этот фактор может существенно повлиять на теплопередачу и должен учитываться при моделировании.

2.2 Математическое моделирование процессов формирования теплового режима тупиковых горных выработок

В этом разделе рассмотрена задача о сопряженном теплообмене в системе «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода – воздух в вентиляционном трубопроводе» [104]. Геометрически трубопровод, выработка и массив представлены в виде цилиндров с круговым сечением. Допускается, что трубопровод находится в центре выработки, которая в свою очередь находится в центре массива (смотри рисунки 2.4 и 2.5).

Принимается, что теплофизические параметры (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность) в рассматриваемой системе однородны. Также однородными и постоянными принимаются скорость воздуха в трубопроводе и выработке. Поверхность трубопровода и выработки также однородны.

Теплофизические процессы принимаются нестационарными. Однако, поскольку время протекания теплофизических процессов в трубопроводе и выработке значительно быстрее, чем в массиве, то теплоперенос в выработке и трубопроводе принимается квазистационарным и явно от времени не зависит.

В связи с явно выраженным турбулентным течением воздуха в выработке и трубопроводе принимается, что температура воздуха по поперечному сечению выработки и трубопровода одинакова [96]. 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.

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

В модели не учитываются: влагообмен в явном виде с водой на поверхностях выработки и трубопровода; тепловые процессы, связанные с химическими реакциями в породном массиве и в воздухе; диффузионный теплоперенос в воздухе. Также принимается отсутствие массопереноса в породном массиве.

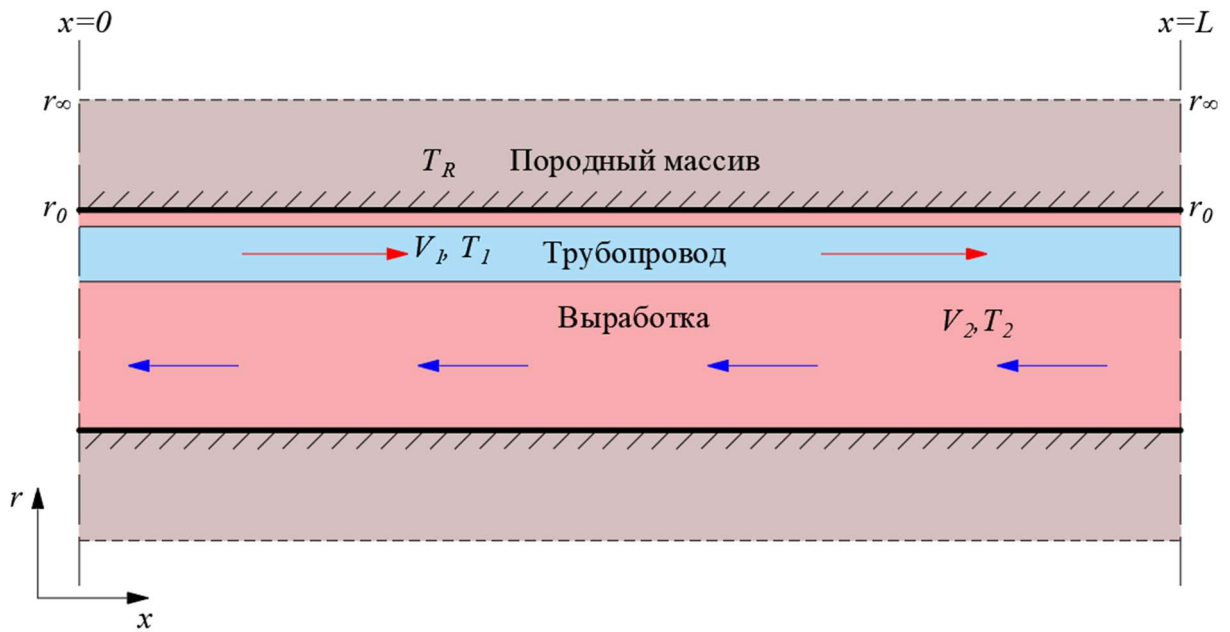


Рисунок 2.4 – Схема к постановке задачи теплообмена между воздухом в вентиляционном трубопроводе, воздухом в горной выработке и породным массивом

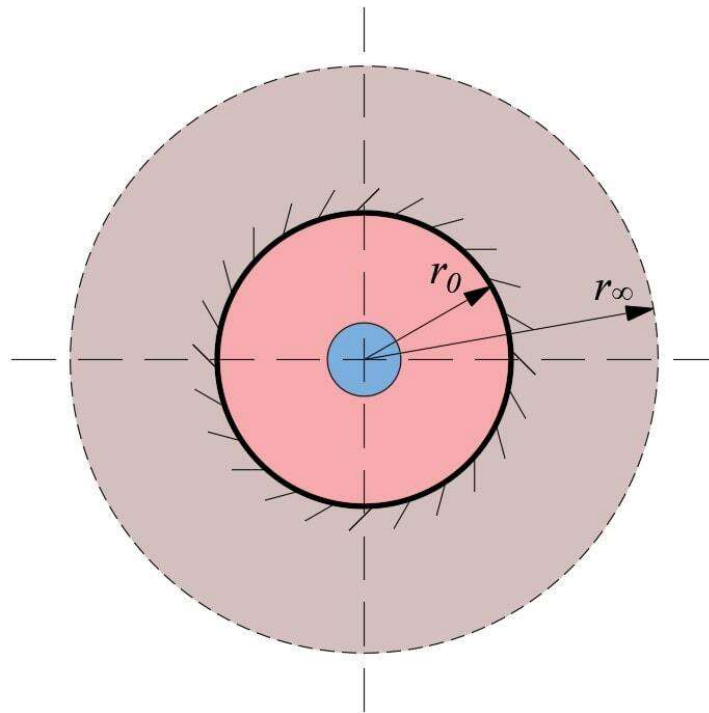


Рисунок 2.5 – Схема к постановке задачи теплообмена между воздухом в вентиляционном трубопроводе, воздухом в горной выработке и породным массивом

С учетом принятых допущений модель сопряженного теплообмена системы «вентиляционный трубопровод – выработка – породный массив» может быть описана системой уравнений (2.5 - 2.7):

Теплоперенос внутри вентиляционного трубопровода:

$$G_1 \cdot c \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} = (T_{wo} - T_1) \cdot k_{wi} \cdot \pi + q(x), \quad (2.5)$$

теплоперенос в выработке:

$$G_2 \cdot c \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} = (T_{wo} - T_1) \cdot a_{wo} \cdot P_{wo} + (T_R - T_2) \cdot a_R \cdot P_R + q(x), \quad (2.6)$$

теплоперенос в породном массиве:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T_R}{\partial t} = \lambda_R \cdot \Delta T_R, \quad (2.7)$$

где T_1 – температура воздуха внутри вентиляционного трубопровода, °C; T_2 – температура воздуха в выработке, °C; T_R – температура породного массива, °C; T_{wo} – температура внешней поверхности стенки вентиляционного трубопровода, °C; ρ – плотность, кг/м³; c – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C); 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·°C); $\Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \right)$ – оператор Лапласа; k_{wi} – линейный коэффициент теплопередачи через стенку трубопровода и пограничный слой воздушного потока на внутренней границе трубопровода, Вт/(м·°C); q – приведенная мощность точечного теплового источника (вентилятора), Вт/м; a_{wo} – коэффициент теплоотдачи воздуха снаружи вентиляционного трубопровода, Вт/(м²·°C); P_{wo} – периметр наружной стенки трубопровода, м; a_R – коэффициент теплоотдачи воздуха на поверхности выработки, Вт/(м²·°C); P_R – периметр горной выработки, м; ε_{π} – приведенная степень черноты поверхности тел, участвующих в теплообмене; $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·K⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Граничные условия для (2.5 - 2.7):

$$\begin{aligned} & (T_{wo} - T_1) \cdot k_{wi} \cdot \pi \\ & = (T_2 - T_{wo}) \cdot a_{wo} \cdot P_{wo} + \varepsilon_{\pi} \cdot C_0 \cdot P_{wo} \\ & \cdot \left[\left(\frac{T_R + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{wo} + 273,15}{100} \right)^4 \right], \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$T_1 \Big|_{x=0} = T_{1,0}, \quad (2.9)$$

$$T_2 \Big|_{x=L} = T_{1,L}, \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \lambda_R \frac{\partial T_R}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = & \left\{ (T_R - T_2) \cdot a_R + \varepsilon_{\pi} \cdot C_0 \cdot \right. \\ & \left. \cdot \left[\left(\frac{T_R + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{wo} + 273,15}{100} \right)^4 \right] \right\} \Big|_{r=r_0}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$T_R \Big|_{r=r_\infty} = T_{R,0}, \quad (2.12)$$

$$\lambda_R \frac{\partial T_R}{\partial x} \Big|_{x=0, x=L} = 0. \quad (2.13)$$

Коэффициент k_{wi} определяется по формуле:

$$k_{wi} = \frac{1}{\frac{1}{a_{in} d_{in}} + \frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}}}, \quad (2.14)$$

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

Коэффициент теплоотдачи между воздухом и горной породой определяется по формуле Щербаня:

$$a_R = 3,4 \cdot \frac{V_2^{0,8}}{d_R^{0,2}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, \quad (2.15)$$

где V_2 – скорость воздуха внутри выработки, м/с; d_R – эквивалентный диаметр выработки, м.

Коэффициент теплоотдачи воздуха в пограничном слое на внутренней стенке вентиляционного трубопровода определяется исходя из безразмерного комплекса (числа Нуссельта Nu) по формуле:

$$a_{in} = \frac{\lambda_a}{d_{in}} \cdot \text{Nu}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, \quad (2.16)$$

где λ_a – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C);

Число Нуссельта определяется по эмпирической формуле Михеева:

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot \text{Pr}_t^{0,43} \cdot \text{Re}_1^{0,8}, \quad (2.17)$$

где Pr_t – число Прандтля, которое для воздуха в турбулентном режиме течения принимается равным 0,71; Re – число Рейнольдса, которое определяется по формуле:

$$\text{Re}_1 = \frac{V_1 \cdot d_{in}}{\nu}, \quad (2.18)$$

где V_1 – скорость воздуха в вентиляционном трубопроводе, м/с; ν – кинематическая вязкость воздуха, определяется по справочным материалам, м²/с.

ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с. Кинематическая вязкость определяется по формуле:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (2.19)$$

где η – коэффициент динамической вязкости, который является постоянным и определяется по справочным материалам, Па·с;

ρ – плотность воздуха в вентиляционном трубопроводе, кг/м³, определяется по формуле идеального газа:

$$\rho = \frac{P_{\text{бар}}}{287 \cdot (273 + T_{1,0})}, \text{ кг/м}^3 \quad (2.20)$$

где $P_{\text{бар}}$ – барометрическое давление воздуха в выработке, гПа.

Коэффициент теплоотдачи снаружи вентиляционного трубопровода (a_{wo}) определяется также по формуле (2.16), но число Нуссельта находят по другой формуле, соответствующей случаю параллельного обтекания потоком круглой трубы:

$$\text{Nu} = 0,037 \cdot \text{Pr}^{0,43} \cdot \text{Re}_2^{0,8}. \quad (2.21)$$

В качестве числа Прандтля в (2.21) также принимается величина 0,71, а величина числа Рейнольдса определяется по формуле, аналогичной (4):

$$\text{Re}_2 = \frac{V_2 \cdot d_{wo}}{\nu}, \quad (2.22)$$

где V_2 – скорость воздуха в выработке, м/с.

Приведенная степень черноты ($\varepsilon_{\text{п}}$) определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{P_{wo}}{P_R} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (2.23)$$

ε_1 – степень черноты поверхности вентиляционного трубопровода, принимается по справочникам [45];

ε_2 – степень черноты поверхности выработки, принимается по справочникам.

Численная реализация

Для численной дискретизации уравнений (2.5 - 2.14) по пространству применялся метод конечных объемов [103], для дискретизации по времени – неявной схеме Эйлера [84].

Шаг по времени принимается постоянным. Вычислительная сетка в массиве состоит из прямоугольных элементов и по глубине массива принимается неравномерной со сгущением на границе контакта массива и выработки (см. рисунок 2.6). Вычислительная сетка вдоль трубопровода и массива принимается равномерной.

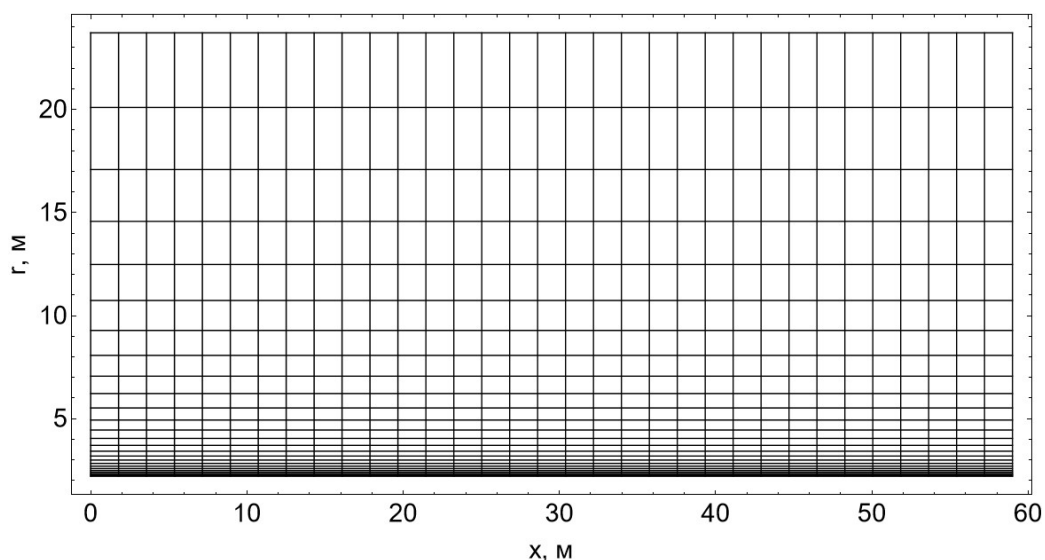


Рисунок 2.6 – Пример вычислительной сетки для породного массива

Стоит отметить, что 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 выработки;
- 2) перестроение вычислительной сетки трубопровода, выработки и массива на новую длину может осуществляться двумя способами. Первый – перестроение происходит один раз 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.

Учет динамики роста выработки необходим для имитации развития горной выработки во времени и учета фактора предыстории теплофизических процессов.

2.3 Калибровка математической модели

Для калибровки модели был выбран параметр теплоотдачи внутренней стенки вентиляционного трубопровода a_{in} , т. к. его значение рассчитывается по формуле для идеальной трубы, а реальный гибкий вентиляционный трубопровод имеет значительное

количество возмущающих факторов, которые оказывают влияние на коэффициент теплоотдачи (например перегибы при поворотах трубы, стыки между секциями, места креплений к кровле выработки). Калибровка производилась на основе формулы (2.8). Внешний коэффициент теплоотдачи трубопровода a_{wo} не рассматривается при калибровке, т. к. по сравнению с a_{in} его влияние на температуру поверхности вентиляционного трубопровода минимально из-за невысокой скорости движения воздуха внутри выработки.

Поскольку на момент проведения экспериментальных исследований на Гремячинском ГОКе (см. таблицу 2.1) замеры температуры поверхности выработок не проводились, использовать данные этих исследований для калибровки модели не представлялось возможным. Поэтому, для калибровки модели были проведены дополнительные экспериментальные исследования в одном из медно-никелевых рудников Красноярского края.

Для проведения калибровки были измерены температура поверхности вентиляционного трубопровода, температура поверхности выработки, температура и скорость движения воздуха внутри вентиляционного трубопровода и выработки, а также геометрические размеры выработки и вентиляционного трубопровода. Приведенная степень черноты определялась по формуле (2.23), где для вентиляционного трубопровода степень черноты принята для резины $\varepsilon_1 = 0,945$, а для поверхности выработки была принята для базальта $\varepsilon_2 = 0,72$, в результате приведенная степень черноты составила $\varepsilon_n = 0,88$. Коэффициенты теплоотдачи a_{in} и a_{wo} определялись по формуле (2.16). Схема размещения замерных точек и результаты замеров приведены на рисунке 2.7 и в таблице 2.3.

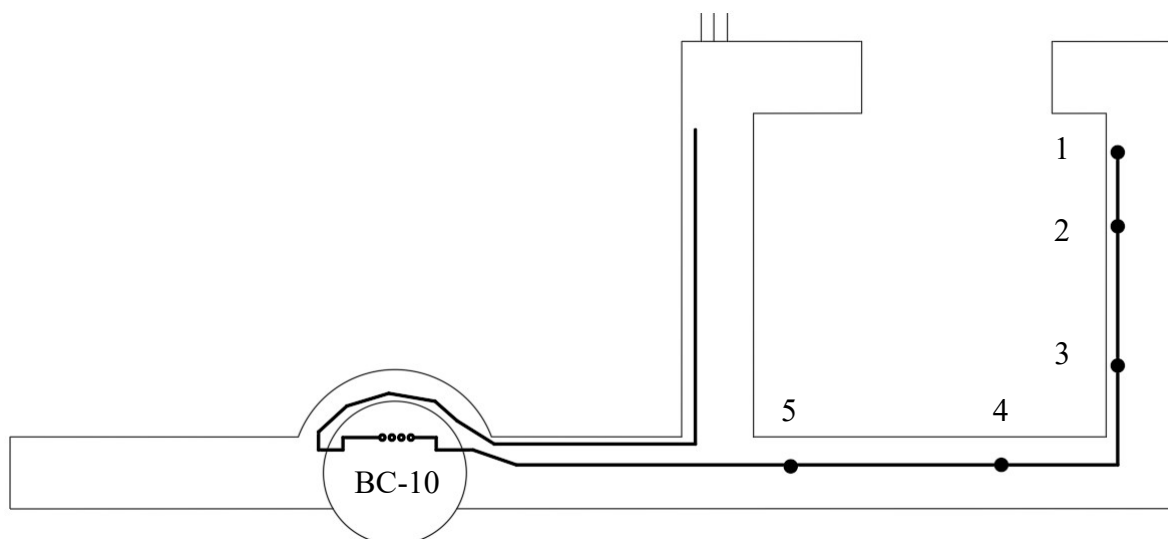


Рисунок 2.7 – Схема размещения мест проведения замеров

Экспериментальные исследования проводились в строящейся разведочной выработке, проветривание которой осуществляется с поверхности по двум вентиляционным трубопроводам диаметром 0,9 м. Для проведения замеров был выбран наиболее удаленный от ствола ВС-10 рукав вентиляционного трубопровода.

Таблица 2.3 – Результаты замеров интенсивности нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе по точкам

№ точки	Температура воздуха в трубопроводе	Температура воздуха в выработке	Температура окружающей породы, °С	Температура поверхности трубопровода	Расход воздуха	Удаление от забоя
1	23,1 °С	29,2 °С	34,2	28,2 °С	2,9 м³/с	0 м
2	22,8 °С	29,0 °С	34,8	27,2 °С	3,2 м³/с	13,7 м
3	22,6 °С	28,7 °С	34,4	26,5 °С	3,4 м³/с	22 м
4	21,7 °С	28,3 °С	33,5	25,0 °С	4,0 м³/с	50 м
5	21,2 °С	27,5 °С	28,3	23,3 °С	4,3 м³/с	63 м

Результаты расчета коэффициентов теплоотдачи и приведенной степени черноты приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты расчета a_{in} , a_{wo} и $\epsilon_{п}$

№ точки	Теплоотдача наружной стенки, a_{wo} Вт/(м²·°С)	Теплоотдача внутренней стенки, a_{in} , Вт/(м²·°С)	Приведенная степень черноты, $\epsilon_{п}$
1	1,82	13,19	0,88
2	1,98	14,29	
3	2,07	14,99	
4	2,36	17,07	

№ точки	Теплоотдача наружной стенки, a_{wo} Вт/(м ² ·°С)	Теплоотдача внутренней стенки, a_{in} , Вт/(м ² ·°С)	Приведенная степень черноты, $\epsilon_{п}$
5	2,51	18,11	

Для калибровки значений a_{in} был применен калибровочный коэффициент k , значения которого подбирались таким образом, чтобы при вставке полученных экспериментальных и расчётных значений левая и правая часть уравнения (2.8) были равны. Значения для точки № 1 были исключены из анализа, т. к. её параметры существенно отличаются от остальных точек. Это может быть связано с тем, что точка № 1 была расположена вплотную к забою выработки, где течение воздуха еще не установилось, а поток являлся сильно турбулизированным. Результаты расчета калибровочного коэффициента приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты расчета калибровочного коэффициента k

№ точки	Калибровочный коэффициент k
2	0,92
3	0,89
4	1,05
5	1,06
Среднее значение:	0,98

Результаты экспериментальных исследований показали, что коэффициенты теплоотдачи вентиляционного трубопровода близки к значениям рассчитываемых для идеальных труб. Полученное среднее значение калибровочного коэффициента k использовано при дальнейших расчетах коэффициента теплоотдачи внутренней стенки вентиляционного трубопровода a_{in} .

2.4 Оценка влияния лучистого теплообмена на нагрев воздуха в вентиляционном трубопроводе

Для оценки возможностей управления микроклиматическими условиями в тупиковой выработке путем влияния на лучистый теплообмен необходимо проанализировать в каких условиях его влияние максимально, а в каких минимально. Для этого была проведена серия экспериментальных расчетов теплораспределения в тупиковой выработке с целью определения долей конвективного и лучистого теплообменов в нагреве воздуха в вентиляционном трубопроводе при изменении таких основных параметров, как расход воздуха и температура подаваемого воздуха.

Для проведения этого анализа в модели тупиковой выработки приняты параметры, соответствующие условиям калийного рудника на глубине 1 100 м (см. таблицу 2.6).

Таблица 2.6 – Исходные данные для моделирования

№ п/п	Параметр	Значение
1.	Сечение выработки	19,2 м ³
2.	Диаметр / сечение вентиляционного трубопровода	0,8 м / 0,50 м ³
3.	Температура подаваемого воздуха	20 °С
4.	Температура нетронутых пород	32,5 °С
5.	Барометрическое давление	114 600 Па
6.	Плотность воздуха (усредненная)	1,34 кг/м ³
7.	Расход воздуха	5,0 м ³ /с
8.	Теплоемкость пород	930 Дж/кг·°С
9.	Теплопроводность пород	5,2 Вт/м·°С
10.	Плотность пород	2150 кг/м ³
11.	Степень черноты гибкого вентиляционного трубопровода	0,945
12.	Степень черноты стенок выработки	0,960
13.	Скорость подвигания забоя	20 м/сут
14.	Период расчета	20 дней

Результаты расчета теплораспределения приведены на рисунках 2.8 и 2.9.

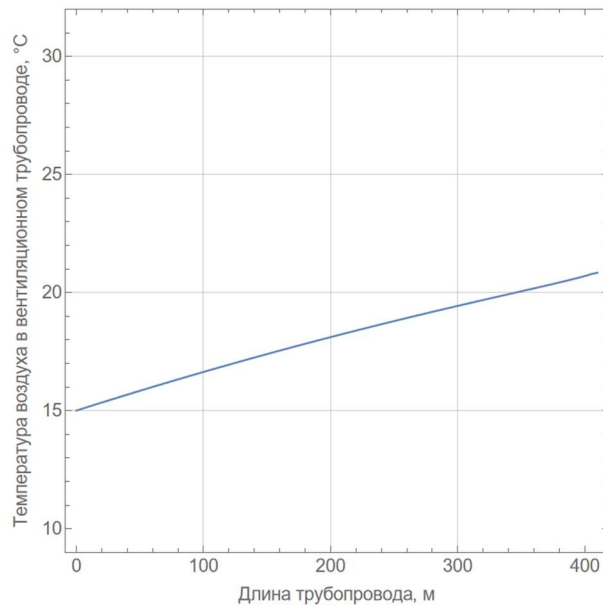


Рисунок 2.8 – График температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе

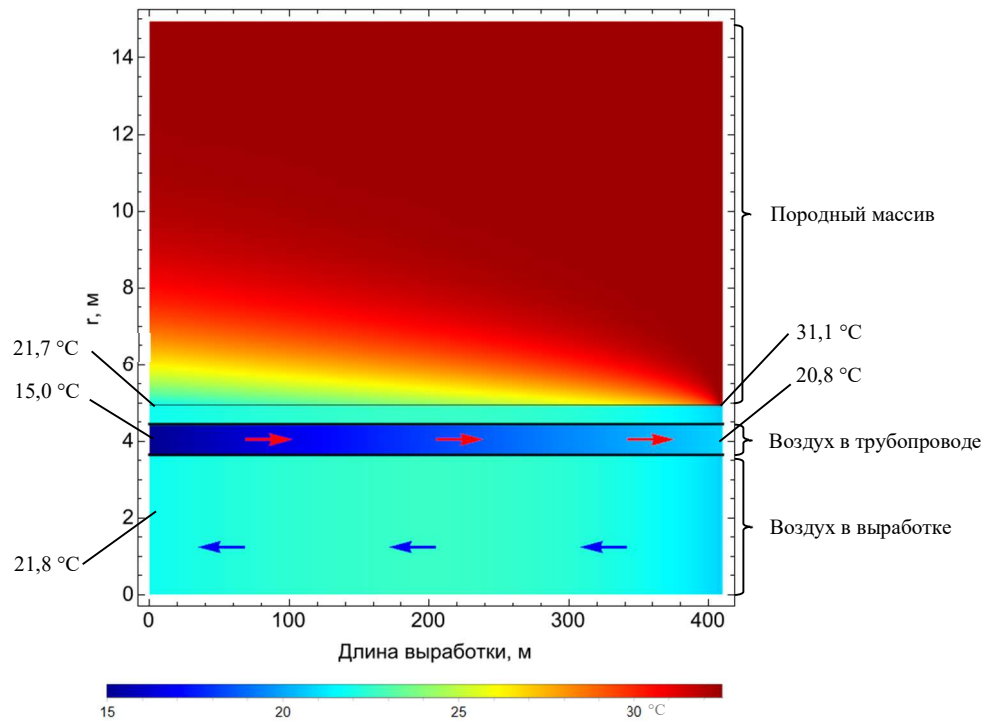


Рисунок 2.9 – Модельное теплораспределение в тупиковой выработке

Для определения доли лучистого теплообмена в нагреве воздуха в вентиляционном трубопроводе дополнительно проведено моделирование теплообмена с учетом только конвективного теплообмена (см. рисунки 2.10 и 2.11).

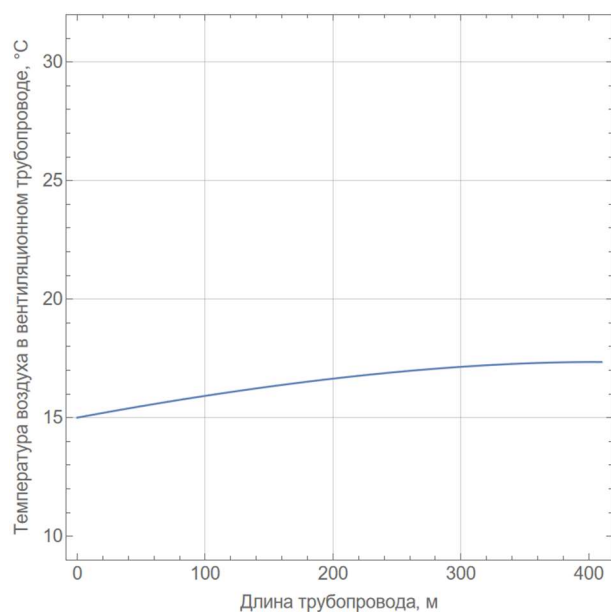


Рисунок 2.10 – График температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе с учетом только конвективного теплообмена

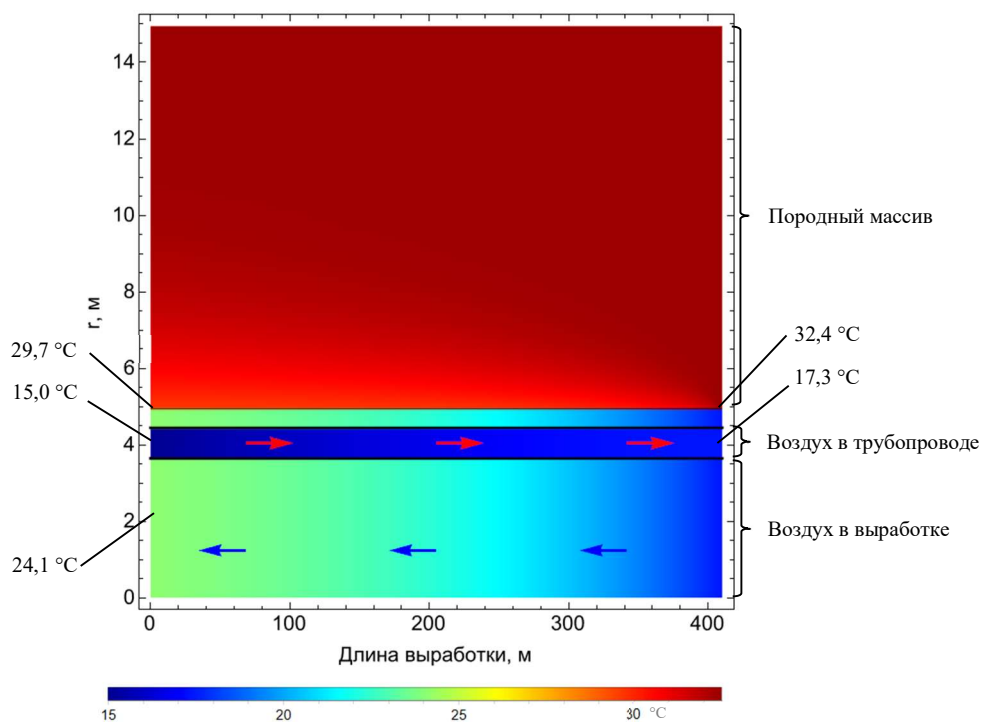


Рисунок 2.11 – Модельное теплораспределение в тупиковой выработке с учетом только конвективного теплообмена

Согласно полученным результатам при учете только конвективного теплообмена нагрев воздуха в вентиляционном трубопроводе составляет 2,3 °C, что составляет 40 % от 5,8 °C в случае, когда учитывается лучистый теплообмен.

Аналогичным способом получены отношения конвективного и лучистого теплообменов для случаев с различным расходом и различной начальной температурой воздуха. Результаты данных расчетов сведены в таблицу 2.7.

Таблица 2.7 – Отношение лучистого и конвективного теплообменов в нагреве воздуха в вентиляционном трубопроводе при различных расходах и температурах воздуха

Расходы воздуха, м ³ /с	2,5	5,0	10,0	20,0
Температура воздуха постоянна – 15 °С. Процент в нагреве воздуха в трубопроводе конвективного / лучистого теплообмена, %	33 / 77	40 / 60	53 / 47	62 / 38
Расход воздуха постоянен – 5,0 м ³ /с. Температура воздуха, подаваемого в трубопровод, °С	10,0	15,0	20,0	25,0
Процент в нагреве воздуха в трубопроводе конвективного / лучистого теплообмена, %	40 / 60	40 / 60	40 / 60	40 / 60

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- при низких расходах в нагреве воздуха доля лучистого теплообмена растет, а при высоких падает;
- температура подачи не влияет на отношение лучистого и конвективного теплообменов при нагреве воздуха в вентиляционном трубопроводе.

Таким образом, наиболее заметно влияние лучистого теплообмена в выработках с низким расходом воздуха. Тем не менее, даже при больших расходах воздуха в тупиковой выработке, влияние лучистого теплообмена на нагрев воздуха в трубопроводе остается значительным и требует учета в расчетах теплораспределения.

2.5 Выводы по главе

На основании проведенных исследований прогнозирования теплораспределения в тупиковых выработках сформулированы следующие выводы:

- на интенсивность нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе существенное влияние оказывает лучистый теплообмен между поверхностью вентиляционного трубопровода и породным массивом. Его наличие может оказывать существенное влияние на теплораспределение в тупиковых выработках, что говорит о необходимости учета данного механизма при моделировании.
- влияние лучистого теплообмена наиболее заметно в выработках с низким расходом воздуха. Однако, даже при больших расходах воздуха в тупиковой

выработке, влияние лучистого теплообмена на нагрев воздуха в трубопроводе остается значительным (в рассмотренных пределах от 38 до 77 %) и требует учета в расчетах теплораспределения в тупиковых выработках.

- разработана математическая модель теплообмена 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.
- результаты моделирования позволяют рассчитывать микроклиматические условия в тупиковой выработке;
- определен поправочный коэффициент для коэффициента теплоотдачи внутри вентиляционного трубопровода ($k = 0,98$);

Полученные результаты позволяют заново оценить известные горнотехнические и теплотехнические способы управления тепловым режимом с учетом моделируемой механики лучистого теплообмена и предложить новые. Оценке горнотехнических методов посвящена следующая глава. Совершенствованию метода расчета систем кондиционирования воздуха для тупиковых выработок посвящена глава 4.

3 ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОМ РЕЖИМОМ ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ГОРНОТЕХНИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ

3.1 Постановка задачи

Под управлением тепловым режимом в тупиковых горных выработках подразумевается регулирование температуры воздуха, подаваемого в забой выработки.

К основным способам, которыми возможно влиять на температуру воздуха, подаваемого в забой, можно отнести [49]:

- изменение сечения вентиляционного трубопровода;
- изменение объема подачи воздуха;
- подбор материалов вентиляционного трубопровода и выработки;
- подбор площади сечения выработки;
- подбор теплоизоляции вентиляционного трубопровода;
- охлаждение воздуха с помощью воздухоохлаждателей.

Все перечисленные способы управления тепловым режимом за исключением последнего относятся к горнотехническим способам регулирования теплового режима. Последний способ относится к теплотехническим. Горнотехнические способы считаются более экономичными, однако их возможность применения зависит от наличия воздуха, подводимого к тупиковой выработке, с температурой ниже максимально допустимой, поэтому применение этих методов на глубоких рудниках без применения теплотехнических зачастую не дает необходимых результатов.

Разработанная в разделе 2.2 модель позволяет выполнить оценку эффективности применения различных методов управления тепловым режимом в тупиковой горной выработке. Для проведения оценки влияния различных факторов на формирование микроклимата в забое была использована модель, построенная на основе характеристик одного из глубоких медно-никелевых рудников (глубина ведения работ 2000 м) Красноярского края:

Таблица 3.1 – Исходные данные для моделирования

№ п\п	Параметр	Значение
15.	Сечение выработки	15,3 м ³
16.	Диаметр / сечение вентиляционного трубопровода	1,2 м / 1,13 м ³
17.	Температура подаваемого воздуха	21,0 °С
18.	Температура нетронутых пород	47,0 °С

№ п/п	Параметр	Значение
19.	Барометрическое давление	124 000 Па
20.	Теплоемкость воздуха	1005 Дж/кг·°С
21.	Плотность воздуха (усредненная)	1,41 кг/м ³
22.	Расход воздуха	15,0 м ³ /с
23.	Теплоемкость пород	539 Дж/кг·°С
24.	Теплопроводность пород	5,16 Вт/м·°С
25.	Плотность пород	4010 кг/м ³
26.	Температуропроводность	2,386·10 ⁻⁶ м ² /с
27.	Степень черноты гибкого вентиляционного трубопровода	0,945
28.	Степень черноты жесткого оцинкованного вентиляционного трубопровода	0,23
29.	Степень черноты стенок выработки	0,72
30.	Скорость движения забоя	3 м/сут
31.	Начальная длина выработки	100 м
32.	Радиус теплового влияния выработки	21,5 м
33.	Период расчета	90 дней

Радиус теплового влияния выработки определялся по формуле [24]:

$$R = \sqrt{4\chi\tau \cdot \ln\left(\frac{s \cdot \Delta T_0}{0,4 \cdot \pi \cdot \chi \cdot \tau}\right)}, \quad (3.1)$$

где χ – температуропроводность горных пород, м²/с;

τ – общее время расчета, с;

ΔT_0 – максимальная разница температур между начальной температурой воздуха и естественной температурой горных пород, °С;

s – поверхность стенок выработки единичной длины, м².

В результате моделирования был получен график температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода, представленный на рисунке 3.1.

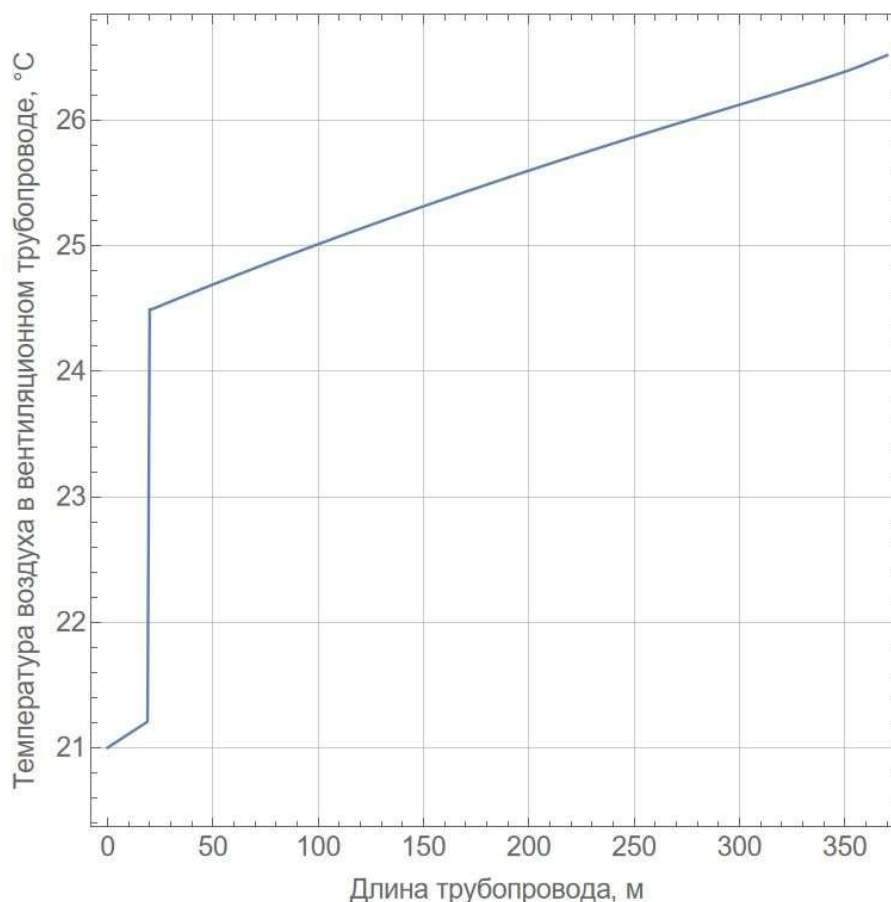


Рисунок 3.1 – Результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе через 90 дней при расходе воздуха 15,0 м³/с

Скачек температуры воздуха в начале выработки происходит из-за работы вентилятора. В данном примере он является довольно ощутимым и оказывает существенное влияние на формирование микроклимата в выработке.

3.2 Исследование эффективности различных способов управления тепловым режимом тупиковой выработки

Для анализа зависимостей изменения температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода от различных факторов необходимо преобразовать уравнение (2.5) в следующий вид:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{(T_{wo} - T_1) \cdot k_{wi} \cdot \pi}{G_1 \cdot c} + \frac{q(x)}{G_1 \cdot c}. \quad (3.2)$$

Исходя из данного уравнения можно сделать выводы, что к снижению температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода приведут следующие мероприятия:

- снижение мощности источника тепловыделения (q) – вентилятора. Мощность вентилятора возможно снизить путем уменьшения аэродинамического сопротивления сети с помощью увеличения сечения вентиляционных трубопроводов;
- увеличение расхода воздуха (G_2);
- снижение температуры поверхности вентиляционного трубопровода (T_{wo}) возможно достичь с помощью подбора материалов поверхности трубопровода и стенок выработки с низким значением степени черноты, теплоизоляцией стенок выработки, а также увеличением сечения выработки;
- снижение коэффициента теплопередачи через стенку трубопровода с помощью теплоизоляции трубопровода (k_{wi}).

Далее каждый из способов управления тепловым режимом рассмотрен более подробно.

3.2.1 Увеличение сечения вентиляционного трубопровода

Увеличение сечения вентиляционного трубопровода при постоянном расходе воздуха приводит к увеличению коэффициента теплопередачи (k). Кроме этого, увеличение сечения приводит к снижению аэродинамического сопротивления сети, что в свою очередь приводит к снижению интенсивности нагрева воздуха на вентиляторе.

Электрическая мощность вентилятора, расходуемая на поддержание движения воздуха через трубопровод в единицу времени, определяется с помощью выражения:

$$N = \frac{R \cdot Q^3}{\eta}, \quad (3.3)$$

где R – коэффициент сопротивления сети, $\text{H} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8$;

Q – расход на вентиляторе, $\text{м}^3 / \text{с}$;

η – КПД рабочего колеса и электродвигателя вентилятора.

Для круглых вентиляционных трубопроводов R можно определить по формуле [63]:

$$R = \frac{6,48 \cdot L \cdot \alpha}{d^5} \quad (3.4)$$

где L – длина трубопровода, м; α – коэффициент аэродинамического сопротивления трения; d – диаметр трубопровода, м.

В результате, при увеличении диаметра вентиляционного трубопровода, мощность вентилятора при одинаковом расходе воздуха снижается. Таким образом, первое слагаемое (обозначим его k_1) уравнения (3.2) при увеличении диаметра

трубопровода увеличивается, а слагаемое (обозначим его k_2) уменьшается. Если аппроксимировать первое слагаемое в пределах рассматриваемого диапазона диаметров (1,2-1,6 м) и разложить множители второго слагаемого, зависящие от диаметра вентиляционного трубопровода, то получится следующая зависимость:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = k_1 \cdot d^{0,25} + k_2 \frac{1}{d^5}. \quad (3.5)$$

В результате увеличение диаметра вентиляционного трубопровода приводит к незначительному увеличению интенсивности нагрева воздуха, однако нагрев воздуха на вентиляторе существенно снижается. Для анализа эффективности данного метода, на рисунке 3.2 приведены графики температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе при постоянном расходе воздуха и различных диаметрах трубопроводов.

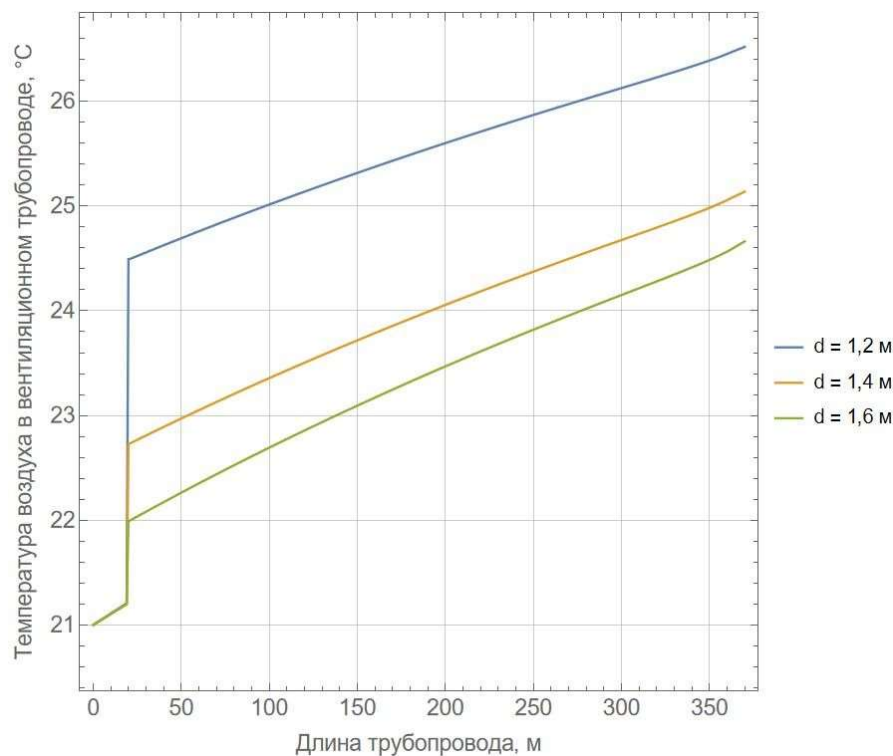


Рисунок 3.2 – Результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе на 90 дней при различных диаметрах трубопровода

Как видно из результатов моделирования температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода, даже небольшое увеличение диаметра вентиляционного трубопровода приводит к тому, что интенсивность нагрева воздуха на вентиляторе существенно снижается. Интенсивность нагрева в вентиляционном трубопроводе при этом несколько увеличилась, это можно увидеть, если определить разницу температур воздуха после вентилятора и на выходе из трубопровода (см. таблицу 3.2).

Таблица 3.2 - Разница температур воздуха после вентилятора и на выходе из трубопровода

Диаметр трубопровода, м	1,2	1,4	1,6
Разница температур после вентилятора и на выходе из трубопровода, °С	2,0	2,4	2,7

Видно, что при увеличении диаметра интенсивность нагрева воздуха в трубопроводе увеличилась. Несмотря на это, положительный эффект сохраняется на значительных расстояниях.

Стоит отметить, что данный метод снижения температуры возможен в случае использования частотного регулирования производительности вентиляторов или замены вентиляторов на модели меньшей мощности. Применение данного способа без частотного регулирования приведет к тому, что вентилятор будет подавать больший объем воздуха, что также приведет к снижению интенсивности нагрева на вентиляторе и в трубопроводе, однако это не всегда возможно из-за ограниченного количества доступного воздуха в шахте.

3.2.2 Изменение расхода воздуха

При анализе влияния расхода воздуха (G) на интенсивность нагрева воздуха по длине можно преобразовать уравнение (3.2) к виду:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = k_1 \frac{1}{G^{0.2}} + k_2 \cdot G^2. \quad (3.6)$$

Несмотря на то, что при увеличении расхода воздуха интенсивность нагрева от конвективного теплообмена уменьшается, мощность вентилятора значительно возрастает (см. формулу (3.3)). Увеличение расхода воздуха неминуемо приведет к увеличению роста температуры на вентиляторе. Поэтому для снижения температуры воздуха в трубопроводе необходимо уменьшать расход воздуха. На рисунке 3.3 представлены результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе при различных расходах воздуха.

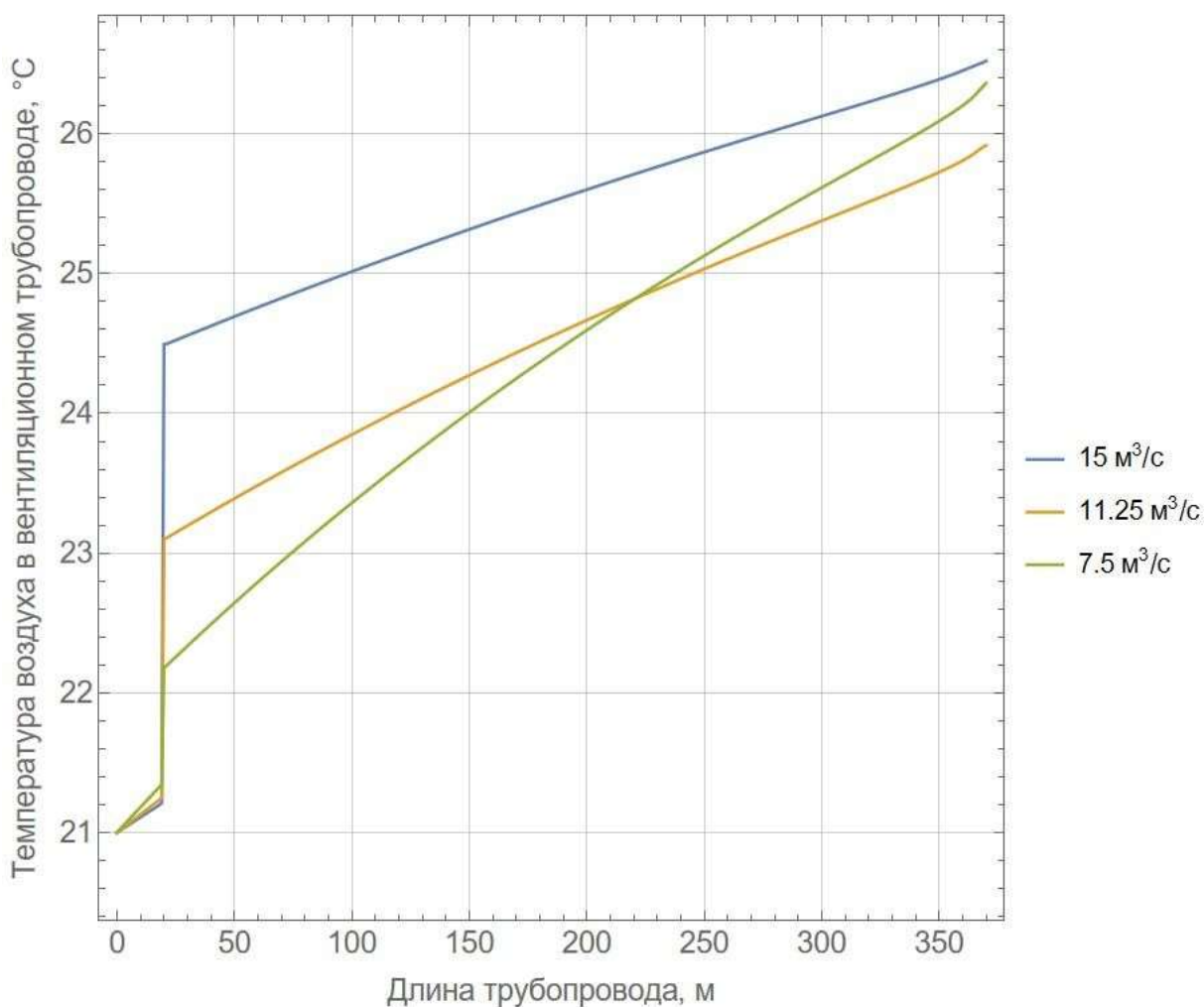


Рисунок 3.3 – Результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе на 90 дней при различных расходах воздуха

Как видно из данных графиков, температура воздуха значительно снижается на участках сразу после вентилятора, однако далее начинает интенсивно возрастать и на определенном расстоянии может превысить значения температуры случая с большим расходом воздуха. Это происходит из-за того, что при низких расходах воздух дольше находится в вентиляционном трубопроводе, в результате чего сильнее нагревается. Так же этому способствует увеличившаяся разница температур воздуха в трубопроводе и в выработке и более медленное растепление породного массива.

Этот способ регулирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе возможно применять, когда имеется относительно короткая тупиковая выработка, которая проветривается избыточным количеством воздуха. Для реализации данного способа так же необходимо частотное регулирование производительности вентилятора или замена вентилятора на модель меньшей мощности.

3.2.3 Изменение сечения выработки

Согласно формуле (2.23) уменьшение сечения выработки приводит к снижению приведенной степени черноты, что снижает интенсивность нагрева воздуха внутри вентиляционного трубопровода. Однако снижение площади сечения ведет к увеличению скорости движения воздуха в выработке, в результате чего увеличивается коэффициент теплоотдачи (a_{wo}) между вентиляционным трубопроводом и воздухом в выработке, а также с породным массивом. Исходя из приведенных соображений довольно трудно сделать вывод о том, каким получится эффект от данного мероприятия, поэтому было выполнено моделирование со следующими параметрами выработки:

Таблица 3.3 – Исходные данные для моделирования

Коэффициент изменения площади	Площадь сечения выработки, м ²	Скорость движения выработки, м/с
0,5	7,65	1,96
1,0	15,30	0,98
1,5	22,95	0,65

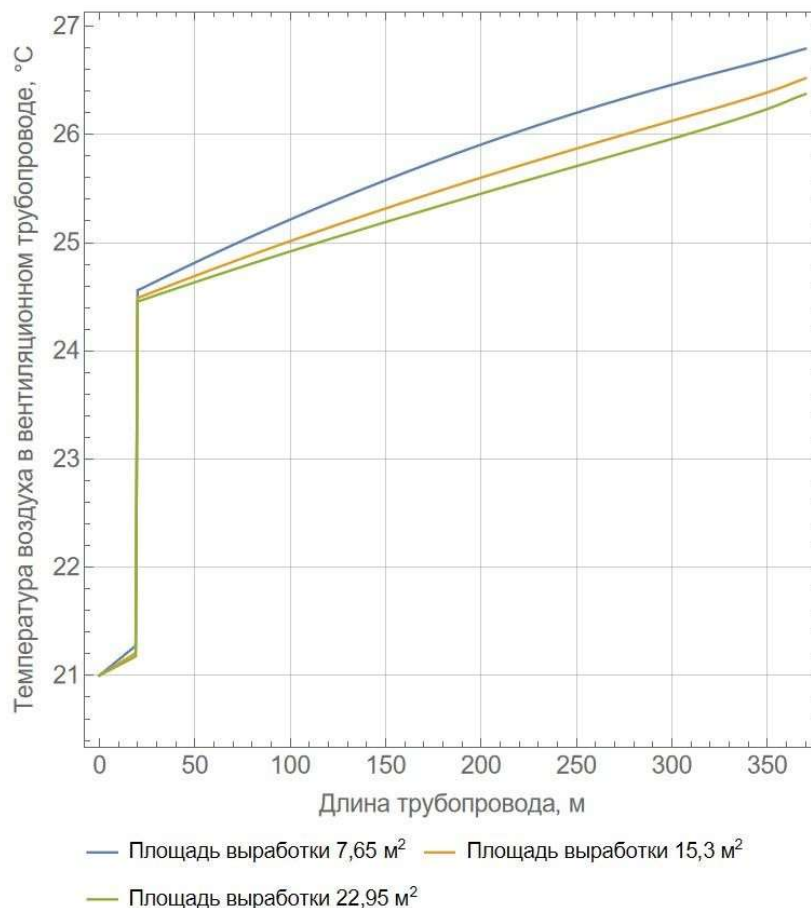


Рисунок 3.4 – Результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе на 90 дней при различных сечениях выработки

Основываясь на полученных результатах моделирования, можно сделать вывод, что при увеличении площади сечения выработки, интенсивность нагрева воздуха внутри вентиляционного трубопровода снижается, а при уменьшении сечения выработки увеличивается. Это объясняется тем, что при увеличении сечения выработки коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности вентиляционного трубопровода и поверхности выработки снижается в результате падения скорости движения воздуха, в следствие чего тепловой поток к воздуху в трубопроводе снижается. При этом тепловой поток от лучистого теплообмена растет, но недостаточно, чтобы скомпенсировать уменьшение теплового потока от конвективного теплообмена.

3.2.4 Применение теплоизоляции вентиляционного трубопровода

Применение теплоизолированного трубопровода гарантированно снижает интенсивность нагрева воздуха внутри вентиляционного трубопровода и позволяет обеспечить допустимую температуру в пределах забоя в допустимых значениях в случаях если температура воздуха после нагрева вентилятором ниже допустимой на несколько градусов. Снижение интенсивности нагрева воздуха происходит главным образом за счет увеличения термического сопротивления вентиляционного

трубопровода, а также за счет роста температуры поверхности вентиляционного трубопровода, в результате чего влияние лучистого теплообмена сильно снижается.

С целью обеспечения требуемой температуры воздуха в забое выработки необходимо подобрать толщину теплоизоляции с заданным коэффициентом теплопроводности. В таблице 3.4 приведены характеристика теплоизоляции (минеральной ваты) и рассчитываемые толщины. На рисунке 3.5 приведены результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе при различных толщинах теплоизоляции.

Таблица 3.4 – Характеристики теплоизоляции (минеральная вата) вентиляционного трубопровода

Параметр	Значение
Коэффициент теплопроводности теплоизоляции	0,07 Вт/(м·°С)
Толщина слоя теплоизоляции (h)	20 мм
	50 мм
	100 мм

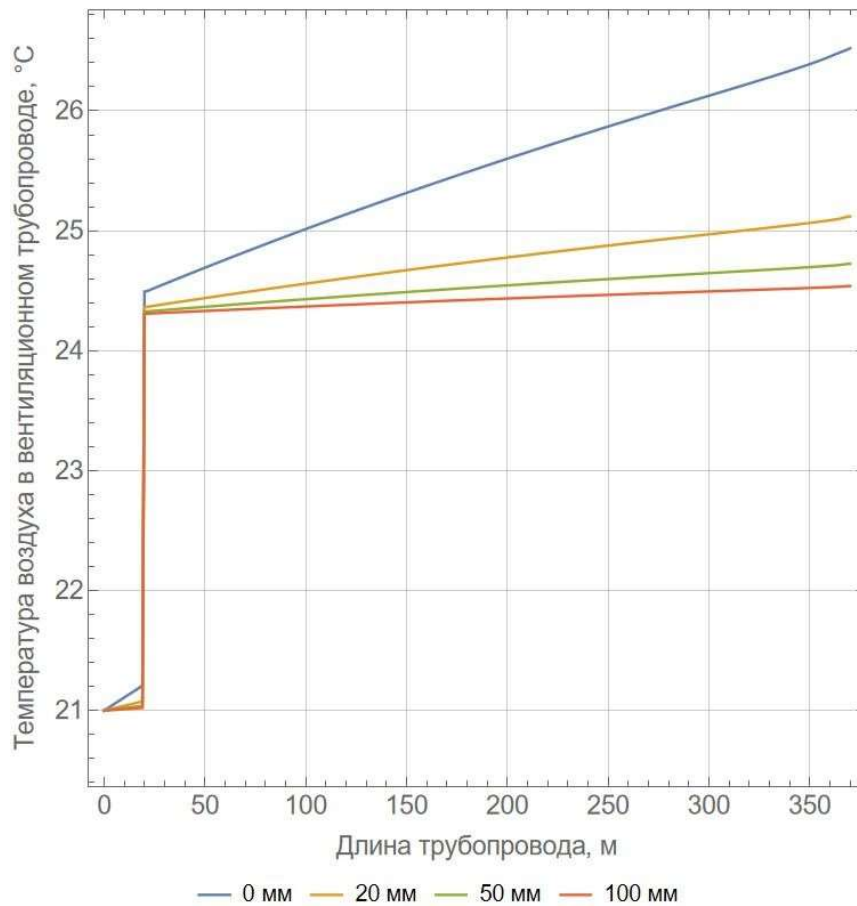


Рисунок 3.5 – Результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе на 90 дней при различных толщинах теплоизоляции

Эффект от применения теплоизоляции возрастает по мере отдаления забоя выработки от устья, поэтому её рационально применять в выработках, имеющих значительную проектную длину.

3.3 Изменение степени черноты

Как уже было установлено ранее, значительное влияние на нагрев воздуха в условиях глубоких рудников оказывает лучистый теплообмен, который дополнительно нагревает поверхность вентиляционного трубопровода и может значительно ускорить рост температуры воздуха в трубопроводе. В условиях замкнутого пространства на интенсивность лучистого теплообмена влияет приведенная степень черноты, которая определяется по формуле (2.23). Исходя из данного уравнения приведенную степень черноты можно снизить за счет увеличения периметра вентиляционного трубопровода, уменьшения периметра выработки и снижения степеней черноты вентиляционного трубопровода и стенок выработки. Влияние изменения приведенной степени черноты от размера вентиляционного трубопровода и размера выработки на нагрев воздуха в трубопроводе было учтено при оценке влияния сечения вентиляционного трубопровода в разделе 3.2.1 и размера выработки в разделе 3.2.3. В данном разделе предлагается

новый способ управления тепловым режимом в тупиковой выработке – с помощью изменения степени черноты поверхности вентиляционного трубопровода и поверхности выработки.

Для уменьшения степени черноты вентиляционных трубопроводов возможно применение неокрашенной оцинкованной стали ($\varepsilon = 0,23$) для жестких труб и покрытие алюминиевой фольгой ($\varepsilon = 0,04$) гибких труб. Алюминиевая фольга так же может быть использована как материал для покрытия стенок выработки с целью снижения степени черноты. В таблице 3.5 приведены результаты расчета приведенной степени черноты в зависимости от материала вентиляционного трубопровода и стенок выработки.

Таблица 3.5 – Результаты расчета приведенной степени черноты при различных материалах поверхности трубопровода и выработки

Материал вентиляционного трубопровода	Степень черноты вентиляционного трубопровода (ε_1)	Материал стенки выработки	Степень черноты выработки (ε_2)	Приведенная степень черноты (ε_n)
Резина	0,945	Базальт	0,72	0,86
Оцинкованная сталь	0,23			0,22
Алюминиевая фольга	0,04			0,04
Резина	0,945	Алюминиевая фольга	0,04	0,13
Оцинкованная сталь	0,23			0,09
Алюминиевая фольга	0,04			0,03

Основываясь на полученных результатах расчета приведенной степени черноты, можно сказать, что применение оцинкованных металлических трубопроводов способно снизить влияние лучистого теплообмена в 3,9 раза, применение алюминиевой фольги – в 22 раза. Нанесение фольги на стенки выработки менее эффективно, как с точки зрения расхода материала, так и снижения приведенной степени черноты, так в случае нанесения алюминиевой фольги только на стенки выработки возможно снизить интенсивность лучистого теплообмена в 6,6 раза.

Тем не менее, при комбинированном применении материалов с низким значением степени черноты, как в вентиляционных трубопроводах, так и на поверхности выработки возможно достичь максимального результата. Так в случае покрытия алюминиевой фольгой стенок выработки и трубопровода, возможно снизить лучистый теплообмен в

29 раз. Результаты моделирования температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода приведены на рисунке 3.6.

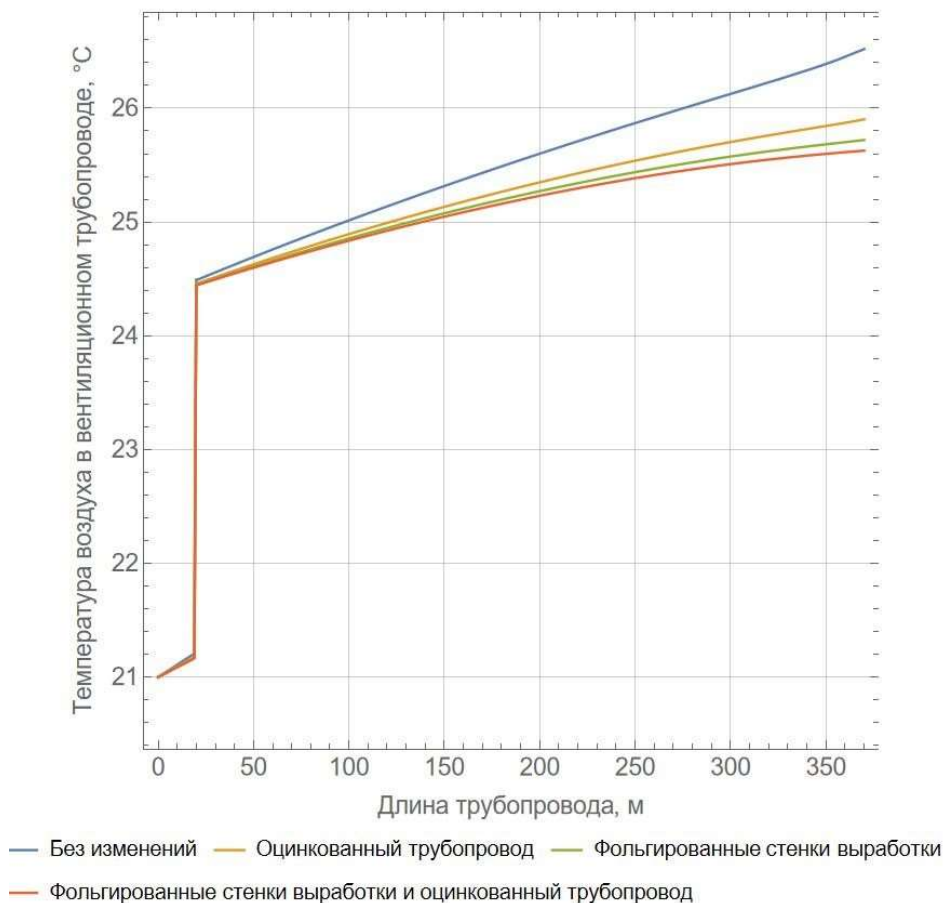


Рисунок 3.6 – Результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе на 90 дней при различных материалах поверхности вентиляционного трубопровода и выработки

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что данный способ снижения температуры воздуха в забое выработки будет тем эффективнее, чем длиннее выработка.

Отдельно стоит отметить, что данный способ позволяет снижать нагрев воздуха в трубопроводе без увеличения его размеров, что может оказаться важным при определенных условиях.

3.4 Эффективность горнотехнических методов

Для проведения сравнения эффективности применения тех или иных методов снижения температуры воздуха в забое применялся следующий критерий:

$$K(L) = \frac{T_0 - T_{m,i}}{T_0 - T_H}, \quad (3.7)$$

где T_0 – температура воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода в случае без технических решений по нормализации микроклимата, °C; $T_{m,i}$ – температура

воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода при применения технического решения по нормализации микроклимата, °С; T_n – температура воздуха на входе в выработку перед вентилятором, °С;

Критерий эффективности определялся на основе результатов моделирования теплораспределения при длине выработки от 0 до 1000 м. Результаты определения критерия эффективности приведены на рисунке 3.7.

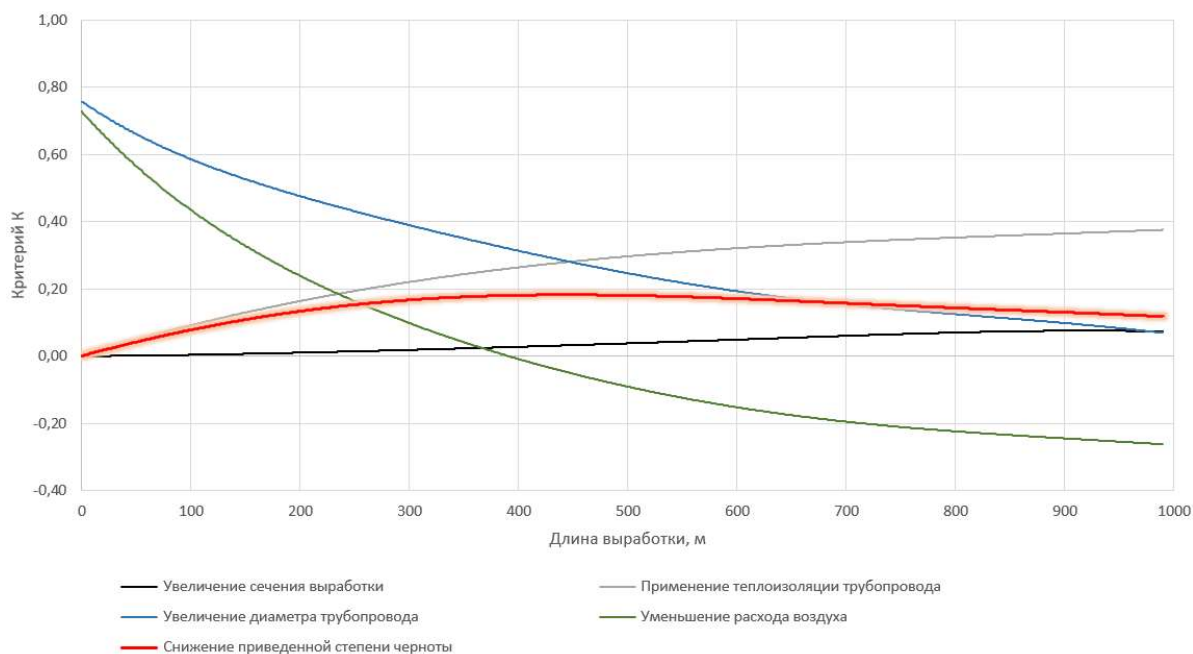


Рисунок 3.7 – Критерий эффективности различных горнотехнических способов снижения температуры в забое выработки

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- При длинах выработки 250-450 м наиболее эффективными способами снижения температуры воздуха в забое является снижение расхода воздуха и увеличение сечения трубопровода;
- При длинах свыше 450 м наиболее эффективным горнотехническим способом снижения температуры будет применение теплоизоляции трубопровода;
- Снижение расхода воздуха в выработке при ее длине свыше 380 м даст отрицательный эффект и приведет к росту температуры в забое.

Длины выработок, приведенные в выводах, справедливы только для данного случая. Полученное значение критерия эффективности возможно использовать на выработках данного горизонта. Для выработок других горизонтов и рудников критерий необходимо корректировать. Полученные выводы отображают общие закономерности для тупиковых выработок в случае, когда температура воздуха, подводимого к ним, существенно ниже температуры нетронутого массива. В случае если температура

воздуха выше или равна температуре нетронутого массива, горнотехнические способы снижения температуры имеют нулевую эффективность.

3.5 Комбинированное применение горнотехнических методов

Для получения наибольшей эффективности горнотехнических методов снижения температуры воздуха в забое выработки возможно их комбинированное применение. На основе результатов оценки эффективности применения различных способов управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках, горнотехнические способы можно поделить на две группы по направленности действия:

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

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

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

Как видно из приведенного анализа, недостатки первой группы, являются достоинствами второй и наоборот. Таким образом, наиболее рационально комбинировать их друг с другом. Так же стоит отметить, что среди способов, снижающих интенсивность нагрева воздуха в трубопроводе, наиболее эффективным является применение теплоизоляции трубопровода (см. рисунок 3.7) и изменение ее толщины, что позволяет легко управлять её эффективностью. Применение остальных комбинаций так же возможно, однако их эффективность будет ниже. Поэтому вторая группа при анализе будет рассматриваться только с теплоизоляцией.

Аналогичная ситуация у способов, снижающих нагрев воздуха у ВМП. Увеличение диаметра вентиляционного трубопровода является более эффективным способом снижения температуры воздуха, чем уменьшение его расхода, т. к. приводит к существенно меньшему нагреву в вентиляционном трубопроводе. Кроме того, на рудниках отсутствует возможность регулировки расхода воздуха в связи с необходимостью обеспечения требуемого расхода в забое и отсутствия запаса по

расходам воздуха. Поэтому первая группа при анализе будет рассматриваться только с увеличением диаметра вентиляционных трубопроводов.

Отдельный интерес представляет комбинация способов первой группы, так как они способны компенсировать недостатки друг друга. Так, например, при увеличении расхода воздуха и увеличении диаметра вентиляционного трубопровода, при правильном соотношении этих двух параметров возможно добиться и снижения нагрева воздуха на ВМП и снижения интенсивности нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе.

На основе вышеизложенного далее будут рассмотрены следующие комбинации горнотехнических способов управления тепловым режимом:

- Увеличение расхода воздуха и диаметра вентиляционных трубопроводов;
- Увеличение диаметра вентиляционных трубопроводов и применение теплоизоляции трубопроводов.

3.5.1 Увеличение расхода воздуха и диаметра вентиляционных трубопроводов

Согласно выводам, сделанным в разделе 3.2.1 увеличение расхода воздуха без изменения диаметра вентиляционного трубопровода несмотря на снижение интенсивности конвективного теплообмена приводит к чрезмерному нагреву воздуха на вентиляторе. Для снижения нагрева воздуха на вентиляторе можно воспользоваться преимуществами увеличения диаметра вентиляционного трубопровода (см. раздел 3.2.2). Для анализа зависимости нагрева воздуха от комбинированного применения методов снижения температуры воздуха объединим уравнения 3.5 и 3.6.

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = k_1 \frac{d^{0,25}}{G^{0,2}} + k_2 \cdot \frac{G^2}{d^5}, \quad (3.8)$$

где k_1 – коэффициент конвективного теплообмена; k_2 – коэффициент теплового источника.

Исходя из данного уравнения можно сделать вывод, что для уменьшения нагрева воздуха от конвективной составляющей необходимо увеличивать расход воздуха. Для уменьшения нагрева воздуха от вентилятора необходимо соблюдать соотношение:

$$\frac{G_a^2}{d_a^5} < \frac{G^2}{d^5}, \quad (3.9)$$

где G_a^2 , d_a^5 – расход воздуха и диаметр вентиляционного трубопровода после изменения.

На основе этого соотношения можно вывести коэффициент соотношения расхода воздуха и диаметра вентиляционного трубопровода:

$$K_c = \frac{G_a^2 \cdot d^5}{d_a^5 \cdot G^2} \quad (3.10)$$

Если коэффициент выше 1, то нагрев от вентилятора увеличивается, если меньше – уменьшается. Таким образом, для снижения нагрева воздуха на вентиляторе необходимо обеспечить как можно меньший K_c .

Для подбора комбинации правильного соотношения данных параметров был рассчитан K_c . В таблицу 3.6 сведены результаты расчета K_c при различных диаметрах и расходах воздуха.

Таблица 3.6 – Результаты расчета K_c при различных диаметрах и расходах воздуха

Расход воздуха, м ³ /с	Диаметр вентиляционного трубопровода, м	K	Мощность вентилятора, кВт	Нагрев воздуха на вентиляторе, °C
15,0	1,2	1	70	3,3
22,5	1,4	1,040	109	3,4
22,5	1,6	0,533	56	1,7

Согласно результатам расчета для получения положительного эффекта от комбинации данных методов при расходе воздуха 22,5 м³/с диаметр воздуховода необходимо увеличить с 1,2 м, до 1,6 м.

На рисунке 3.8 приведены результаты моделирования температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода с увеличенным расходом воздуха и диаметром, на рисунке 3.9 приведены результаты расчета критерия эффективности применения комбинации данных горнотехнических методов.

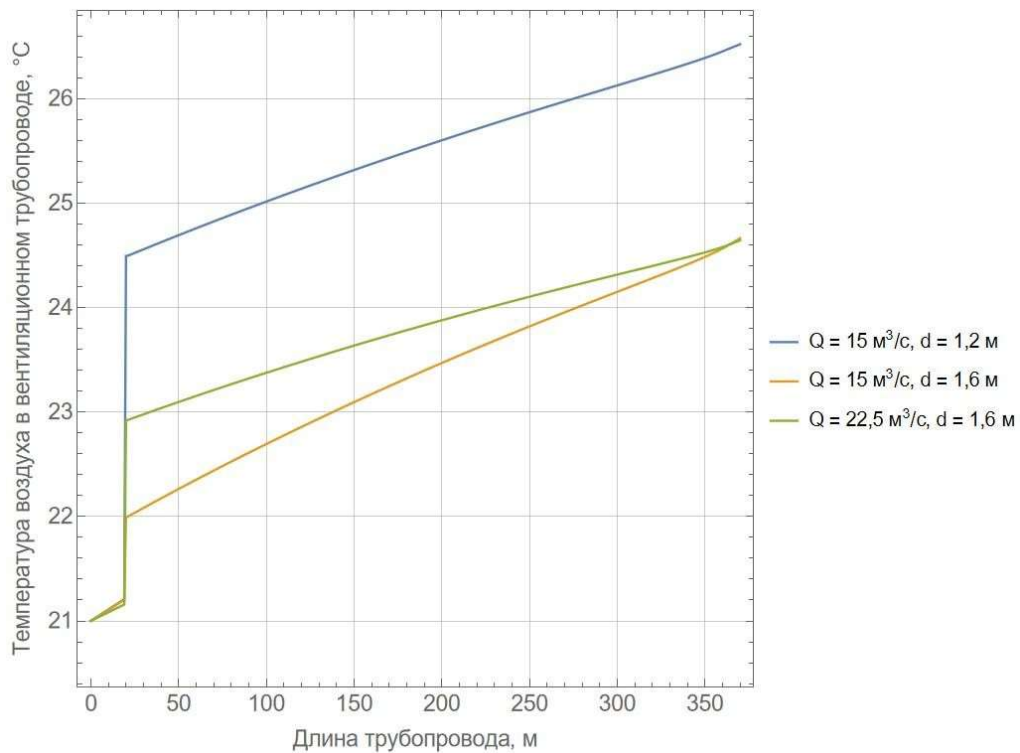


Рисунок 3.8 – Результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе на 90 дней с увеличенным расходом воздуха и диаметром

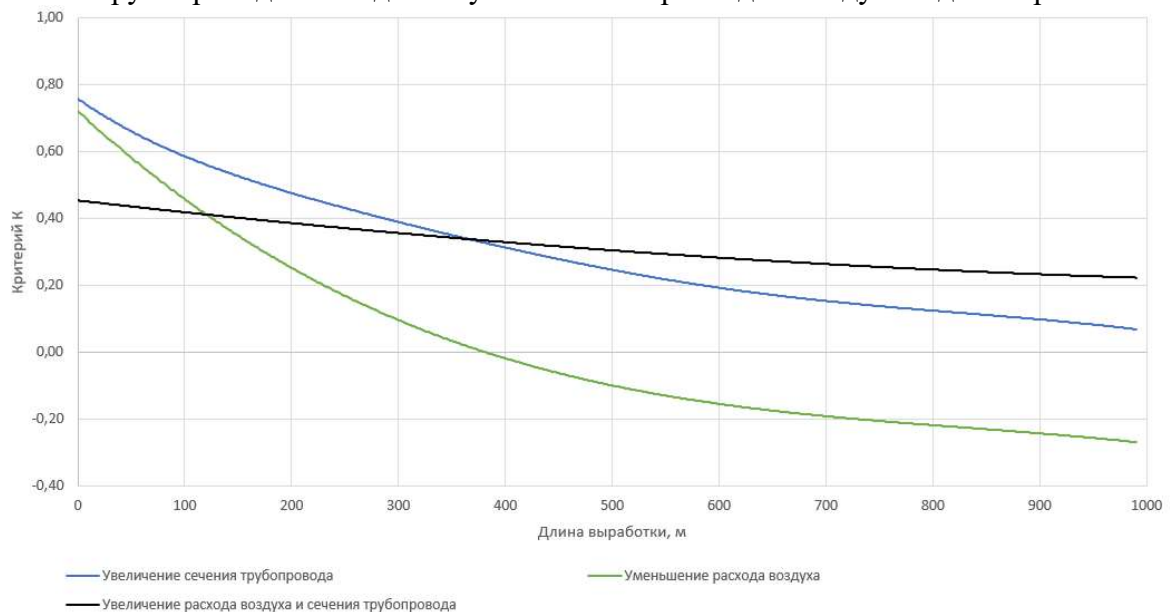


Рисунок 3.9 – Критерий эффективности горнотехнических методов и их комбинации

Согласно полученным результатам моделирования с помощью увеличения расхода воздуха и диаметра вентиляционного трубопровода возможно снизить температуру воздуха, подаваемого в забой выработки, причем по сравнению с увеличением только диаметра трубопровода, при подаче воздуха на большие расстояния (в приведенном примере свыше 360 м) его нагрев происходит медленней, что компенсирует дополнительный нагрев от вентилятора и обеспечивает более низкую температуру в забое. Таким образом, применение данной комбинации способов

снижения температуры воздуха выгодно применять на достаточно протяженных тупиковых выработках.

3.5.2 Увеличение диаметра вентиляционных трубопроводов и применение теплоизоляции трубопроводов

Как было замечено ранее, если увеличивать только диаметр вентиляционного трубопровода, удается снизить интенсивность нагрева воздуха на вентиляторе, однако интенсивность нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе увеличивается. Для устранения этого недостатка возможно использовать теплоизолированные трубопроводы. На рисунке 3.10 приведены результаты моделирования температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода при увеличении диаметра теплоизолированного трубопровода и его теплоизоляции. На рисунке 3.11 приведены результаты расчета критерия эффективности применения комбинации выбранных горнотехнических методов.

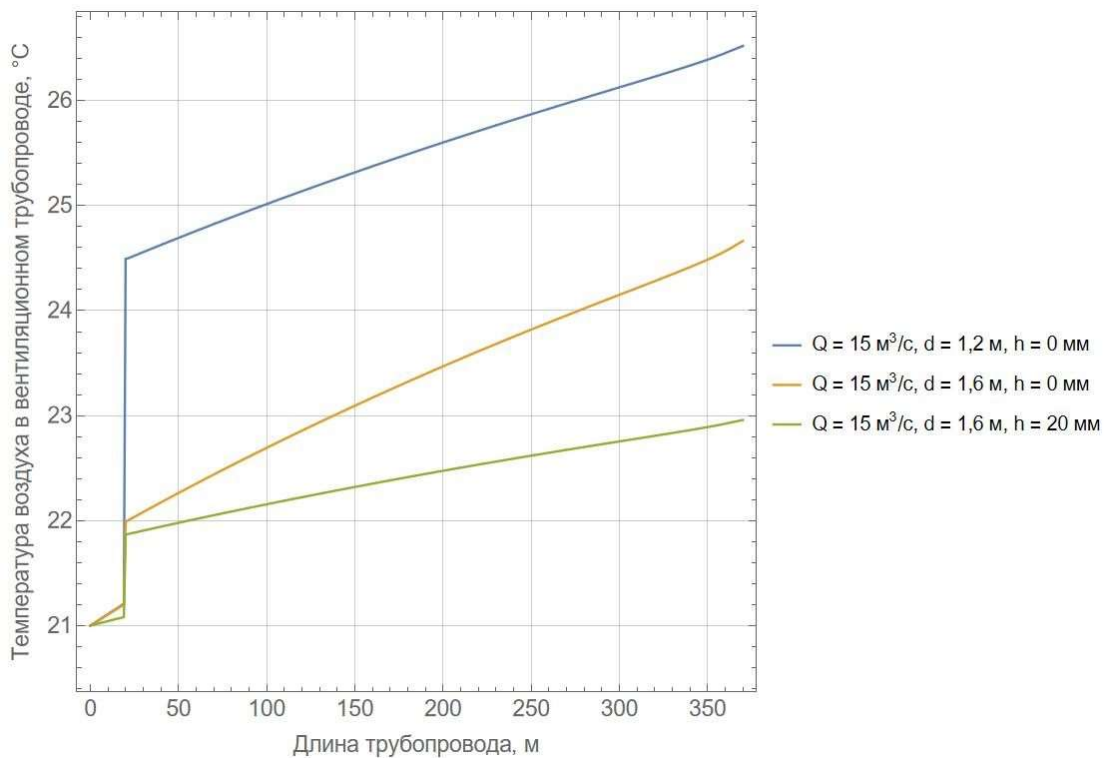


Рисунок 3.10 – Результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе на 90 дней с увеличенным диаметром трубопровода и теплоизоляционным слоем 20 мм

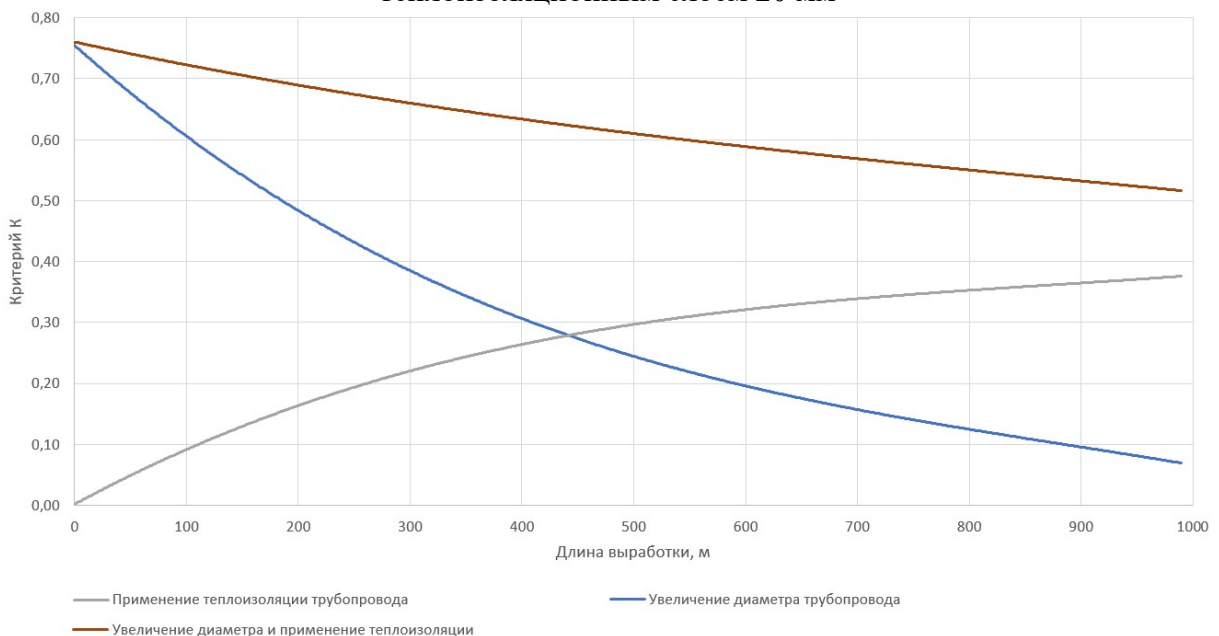


Рисунок 3.11 – Критерий эффективности горнотехнических методов и их комбинации

Согласно полученным результатам моделирования, увеличение диаметра вентиляционного трубопровода и применение теплоизолированных вентиляционных трубопроводов позволяет существенно снизить интенсивность нагрева воздуха в вентиляторе и трубопроводе и добиться наибольшей эффективности снижения температуры воздуха в забое.

На практике возможно применение и других комбинаций горнотехнических способов между первой и второй группой, но они менее эффективны. Однако, отдельно

стоит отметить снижение степени черноты. Отличительной особенностью данного способа является то, что он не требует изменения габаритов выработки или вентиляционного трубопровода, что может стать решающим в стесненных условиях и необходимо учитывать при проектировании.

3.6 Выводы по главе

На основании проведенных исследований горнотехнических способов управления в тупиковых выработках можно сделать следующие выводы:

- определена эффективность различных способов управления тепловым режимом в тупиковых выработках и их комбинаций;
- предложен новый способ управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках с помощью изменения приведенной степени черноты, позволяющий снижать интенсивность нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе без изменения геометрических размеров и веса вентиляционного трубопровода.
- предложена классификация горнотехнических способов управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках по направленности действия.

Полученные результаты позволят усовершенствовать метод расчета систем кондиционирования тупиковых выработок, представленный в разделе 4, и методику разработки систем управления тепловым режимом тупиковых горных выработок, представленную в разделе 5.1.

4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ДЛЯ ГЛУБОКИХ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК

В случае, если горнотехническими методами нормализовать микроклиматические условия не удалось, применяются теплотехнические, а именно системы кондиционирования воздуха (СКВ). Применение воздухоохладителей системы кондиционирования позволяет достичь требуемой температуры воздуха практически при любых температурных условиях. Однако, как показывает современная практика проектирования и применения СКВ в глубоких рудниках, существует несколько нерешенных задач:

- в проектировании при расчете СКВ для определения холодопроизводительности не учитываются дополнительные особенности расчета, которые появляются на больших глубинах из-за возросшего давления воздуха. Если пренебречь этими особенностями, то расчетная холодопроизводительность системы кондиционирования получается меньше необходимой, и требуемая температура воздуха не будет достигнута;
- получение слишком низких расчетных значений температур воздуха после воздухоохладителя (ниже 3 – 6 °С) приводит к невозможности технической реализации из-за обмерзания воздухоохладителя;
- неучет дополнительного растепления породного массива тупиковой выработки в результате работы СКВ;
- неучет времени начала работы СКВ.

Неучет данных факторов приводит к дополнительным погрешностям при расчете требуемой холодопроизводительности, и даже может привести к невозможности технической реализации проекта. В данном разделе предложены способы учета всех вышеперечисленных факторов при расчете СКВ тупиковых выработок.

4.1 Совершенствование расчета требуемой холодильной мощности воздухоохладителя при повышенном давлении воздуха

Для правильного учета влияния роста давления на холодопроизводительность СКВ в рудниках необходимо понимать, как изменяются параметры влажного воздуха от давления [48].

Для определения холодопроизводительности воздухоохладителей систем кондиционирования воздуха используется формула:

$$Q_x = L \cdot \rho \cdot (i_{\text{нач}} - i_{\text{кон}}), \text{ кВт} \quad (4.1)$$

где L – расход воздуха, м³/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; $i_{\text{нач}}$ – энтальпия влажного воздуха перед воздухоохладителем, кДж/кг; $i_{\text{кон}}$ – энтальпия воздуха после воздухоохладителя, кДж/кг.

Расход воздуха (L) определяется расчетом требуемого количества воздуха и является константой [50, 51]. Плотность воздуха (ρ) определяется по формуле идеального газа:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot P_{\text{бар}}}{1013 \cdot (273 + T)}, \text{ кг/м}^3 \quad (4.2)$$

где $\rho_0 = 1,293$ кг/м³ – плотность воздуха при температуре 0 °С; $P_{\text{бар}}$ – барометрическое давление воздуха, гПа; T – температура воздуха, °С.

Барометрическое давление воздуха зависит от глубины [14] места установки воздухоохладителя и определяется по барометрической формуле:

$$P_{\text{бар}} = P_0 \cdot e^{\frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot (T + 273.15)}}, \text{ кг/м}^3 \quad (4.3)$$

где P_0 — давление на уровне земли, кПа; $M = 0,029$ кг/моль — молярная масса воздуха; h — глубина выработки, м; $R = 8,31$ — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — температура воздуха на поверхности, °С; $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения [15, 16].

Так при постоянной температуре воздуха плотность изменяется до глубины 2000 м практически линейно, на рисунке 4.1 представлен график зависимости плотности от глубины в процентах.

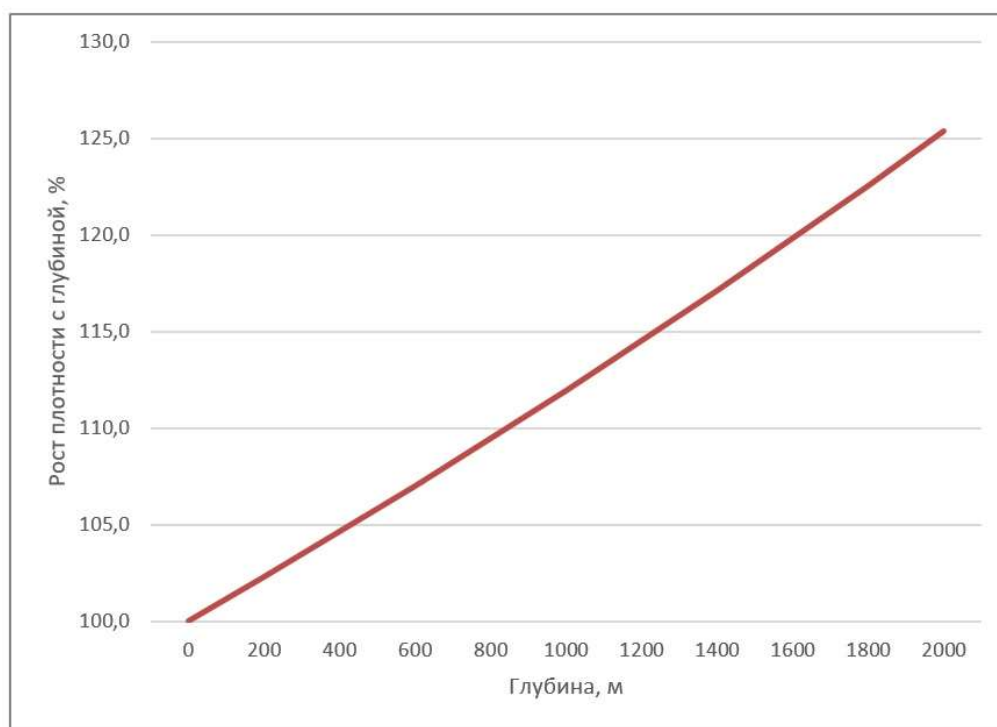


Рисунок 4.1 – График зависимости плотности воздуха от глубины

В результате только роста плотности воздуха мощность системы охлаждения может существенно увеличиться, т. к. как рост плотности практически линеен на данных глубинах, то и рост производительности будет линеен. Результаты расчета зависимости требуемой холодопроизводительности воздухоохлаждающих устройств от глубины по плотности воздуха сведены в таблицу 4.1:

Таблица 4.1 – Зависимость требуемой холодопроизводительности от глубины по плотности воздуха

Глубина, м	Рост холодопроизводительности в %
500 м	5,8 %
1000 м	12,0 %
1500 м	18,5 %
2000 м	25,4 %

Таким образом, для новых глубоких шахт стоимость поддержания допустимых температур обходится дороже не только за счет роста температуры окружающих пород, но и роста плотности воздуха.

Помимо изменения плотности воздуха, с ростом барометрического давления изменяются другие его свойства, такие как максимальное влагосодержание и вытекающие из этого температура точки росы и температура мокрого термометра.

Согласно [17], максимальное влагосодержание влажного воздуха зависит от парциального давления насыщенного водяного пара и определяется по формуле:

$$d_{max} = 621,98 \cdot \frac{P_H}{P_6 - P_H} \text{ г/кг}, \quad (4.4)$$

где P_H – парциальное давление насыщенного водяного пара, которое зависит только от температуры среды:

$$P_H = 0,6112 \cdot e^{\frac{\alpha \cdot t}{\beta + t}} \text{ кПа}, \quad (4.5)$$

где α и β – постоянные для воды $\alpha = 17,504$, $\beta = 241,2$ °С;

t – температура воздуха в °С.

Увеличение барометрического давления также влияет на температуру точки росы.

Температура точки росы определяется по формуле:

$$T_{dp} = \frac{c \cdot \ln \frac{P_{II}}{a}}{b - \ln \frac{P_{II}}{a}} \text{ °С}, \quad (4.6)$$

где a , b , c – константы, $a = 0,6112$, $b = 17,504$, $c = 241,2$ °С;

P_{II} – парциальное давление водяного пара.

При сжатии воздуха, имеющего относительную влажность меньше 100 %, парциальное давление водяных паров растет пропорционально давлению всех газов в смеси и может быть определено по формуле (4.3). Согласно формуле (4.6) с ростом парциального давления температура точки росы также растет.

Увеличение температуры точки росы означает, что дефицит точки росы уменьшается. Дефицитом точки росы называют разницу между температурой воздуха и температурой точки росы. Уменьшение дефицита точки росы ведет к тому, что при охлаждении воздуха на глубине начало конденсации влаги происходит при более высоких температурах в воздухоохладителях, чем на поверхности.

В случае применения для охлаждения воздуха камер орошения в глубоких рудниках крайне важно знать температуру мокрого термометра, которая так же, как и температура точки росы возрастает. Для этого необходимо также определить энтальпию влажного воздуха и относительную влажность [18, 19, 20]:

$$i = 1,006 \cdot t + (2501 + 1,805 \cdot t) \cdot \frac{d}{1000} \text{ кДж/кг}, \quad (4.7)$$

где t – температура воздуха, °С;

d – влагосодержание воздуха, г/кг.

$$\varphi = \frac{P_{II}}{P_H} \cdot 100 \%, \quad (4.8)$$

где P_{II} – парциальное давление водяного пара, кПа;

P_H – давление насыщенного пара, кПа.

Увеличение температуры мокрого термометра можно увидеть, построив линии максимального влагосодержания (100 % относительной влажности) по формуле (4.4) для давлений 101 кПа и 126,7 кПа при одинаковой энтальпии, т.е. частично построив *i-d* диаграмму, также называемой диаграммой Рамзина и Молье [21, 22], для разных давлений (см. рисунок 4.2). Построение *i-d* диаграммы подробно описано в работах [23, 24, 25].

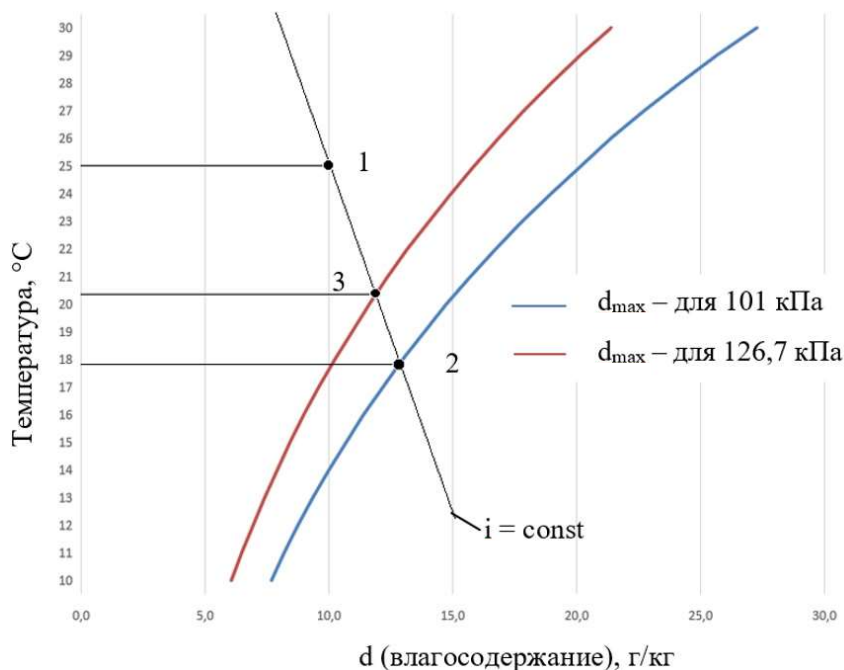


Рисунок 4.2 – Пример. Определение температуры мокрого термометра при разных значениях барометрического давления

Для точки 1, соответствующей температуре 25 °С и влагосодержанию 10 г/кг, температура мокрого термометра при давлении 101 кПа составит 17,9 °С (точка 2), а для давления 126,7 кПа 20,4 °С (точка 3). Рост температуры мокрого термометра является существенным и может привести к значительному снижению эффективности камер орошения.

Как следствие, уменьшение максимального влагосодержания и увеличение температуры точки росы с глубиной при охлаждении воздуха с помощью воздухоохладителей системы кондиционирования воздуха, ведёт к более быстрому достижению температуры начала конденсации. Конденсация влаги из воздуха при охлаждении является негативным процессом, из-за которого необходимо затратить большую холодильную мощность, чем без нее.

Для того чтобы оценить влияние уменьшения максимального влагосодержания с ростом давления с увеличением глубины на холодопроизводительность воздухоохладителей были рассчитаны изменения энтальпий влажного воздуха при различных глубинах и перепадах температур воздуха. Для этого определялось значение

энтальпии по формуле (4.7) для начальной точки (т.к. температура и влагосодержание для нее принимались одинаковыми, ее значение постоянно) и конечной точки, значение которой меняется из-за изменения максимального влагосодержания в воздухе при заданной температуре и растущем барометрическом давлении. Изменение разницы между энтальпиями начальной и конечной точек от глубины в процентном соотношении показано на рисунке 4.3. Влагосодержание начальных точек было подобрано таким образом, чтобы при охлаждении относительная влажность воздуха достигала 100 %, это позволило получить прямую зависимость холодопроизводительности от выпадения большего количества влаги с ростом глубины.

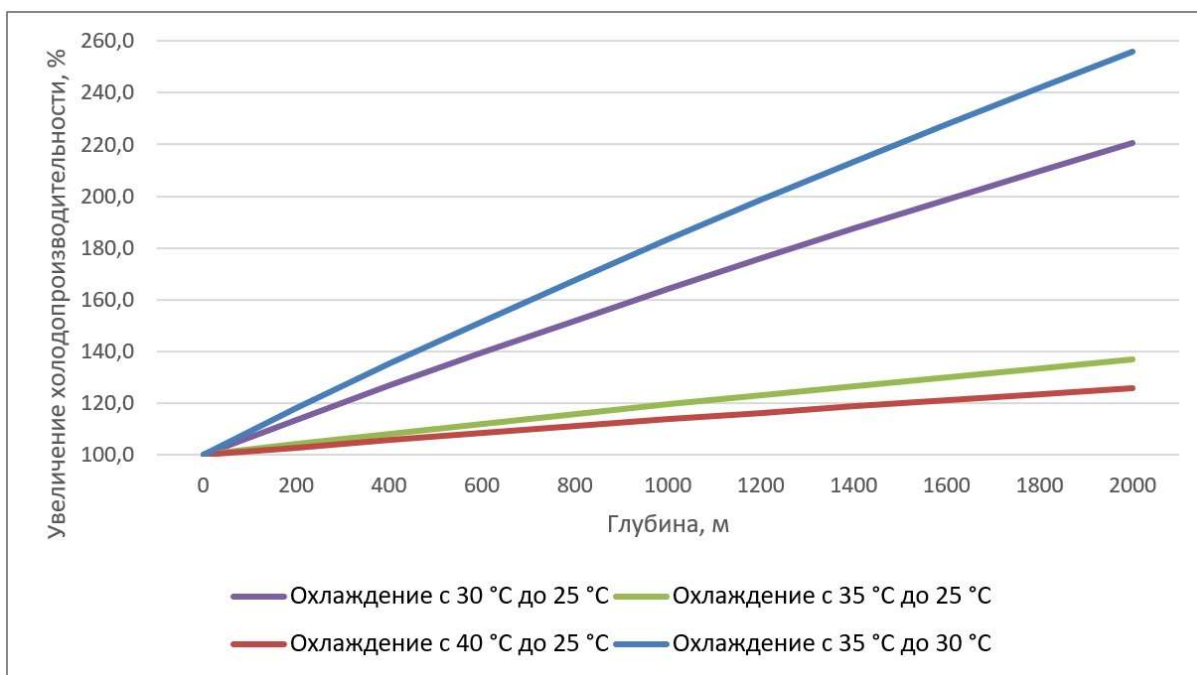


Рисунок 4.3 – График изменения требуемой холодопроизводительности на воздухоохладителе с ростом глубины

По полученным данным можно сделать следующие выводы:

- При меньших перепадах температур рост холодопроизводительности гораздо значительнее, чем при больших. Это объясняется тем, что при малых перепадах температур большую часть затрат на охлаждение составляет конденсация влаги, а на изменение теплосодержания воздуха меньшую. При больших перепадах это соотношение смещается в сторону изменения теплосодержания, а влияние конденсации уменьшается;
- При охлаждении воздуха с большей температурой, но с одинаковым перепадом температур, рост холодопроизводительности будет выше при охлаждении более горячего воздуха. Это объясняется тем, максимальное влагосодержание при росте температуры увеличивается экспоненциально, а значит и разница энтальпий тоже.

Таким образом, помимо зависимости роста холодопроизводительности от роста плотности воздуха существует зависимость роста холодопроизводительности от более ранней конденсации влаги из воздуха из-за возросшей температуры точки росы. На рисунке 4.3 представлены некоторые из наихудших вариантов, когда относительная влажность охлажденного воздуха равна 100 % при всех значениях давления и глубины. При прочих случаях отрицательный эффект будет ниже. Как итог, рост реальной требуемой холодопроизводительности воздухоохладителя находится в диапазоне между значениями роста холодопроизводительности только от плотности воздуха (см. рисунок 4.1) и значениями, учитывающими рост холодопроизводительности и от плотности воздуха, и от увеличения температуры точки росы с ростом барометрического давления (см. рисунок 4.4), ведущей к увеличению затрат холодопроизводительности на конденсацию большего объема влаги из воздуха.

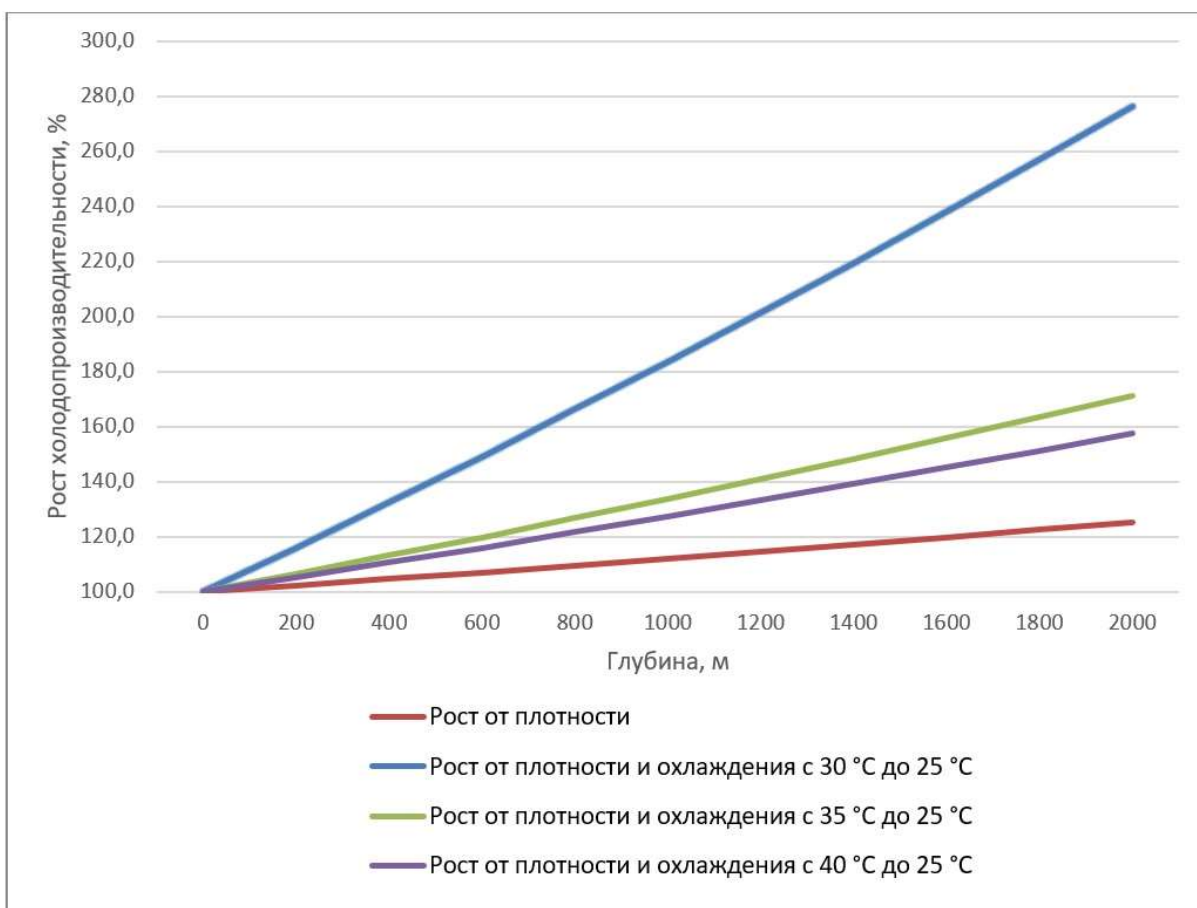


Рисунок 4.4 – График роста требуемой холодопроизводительности с глубиной

В результате можно сделать вывод, что в зависимости от условий охлаждения воздуха требуемая холодопроизводительность воздухоохладителей, а следовательно, и холодильных машин с глубиной может вырасти в несколько раз.

4.2 Разработка технических решений по теплоизоляции вентиляционных трубопроводов

При расчете СКВ протяженных тупиковых выработок может возникнуть ситуация, когда расчетное значение температуры воздуха после воздухоохладителя может опуститься ниже 3 °С. Для обеспечения температуры воздуха после воздухоохладителя ниже данного значения необходимо использовать хладоноситель с температурой ниже 0 °С, что неминуемо приведет к образованию льда на поверхности воздухоохладителя. Образовавшийся лед ухудшит теплотехнические свойства воздухоохладителя, и может даже полностью закупорить его, что приведет СКВ полностью в нерабочее состояние. Кроме того, самым эффективным теплоносителем считается чистая вода, которая обладает самой высокой удельной теплоемкостью среди веществ. Однако температура кристаллизации воды как известно составляет 0 °С, что накладывает ограничения на её охлаждение. Поэтому, если говорить о централизованной системе холодоснабжения в руднике, обеспечить температуру воды на входе в воздухоохладитель ниже 5 – 7 °С, а следовательно, и температуру воздуха после него ниже 8 – 10 °С, является крайне сложной инженерной задачей. Поэтому, когда расчётное значение температуры воздуха опускается ниже 10 °С, необходимо обращать внимание возможность технической реализации охлаждения до этой температуры и при необходимости разрабатывать технические мероприятия позволяющие повысить температуру воздуха после воздухоохладителя.

Существует два варианта решения данной проблемы: размещать воздухоохладитель максимально близко к рабочей зоне или применять теплоизоляцию на вентиляционных трубопроводах. Размещение воздухоохладителя в рабочей зоне позволяет охлаждать воздух до требуемой температуры и не тратить холодильную мощность на дополнительное его переохлаждение для компенсации холодопотерь во время его транспортировки, а также значительно снизить потери на конденсацию дополнительной влаги. Так, на примере, представленном на рисунке 4.5, можно увидеть, что для обеспечения температуры подачи воздуха в забой 26 °С при размещении воздухоохладителя в начале выработки, необходимо снизить температуру воздуха на 6,8 °С до 18,3 °С, в то время как при размещении воздухоохладителя в забое выработки понижать температуру необходимо уже на 3,9 °С до 25,8 °С. Такая разница объясняется различной интенсивностью нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе, возникающей в результате более низкой температуры поверхности вентиляционного трубопровода при размещении воздухоохладителя в начале выработки.

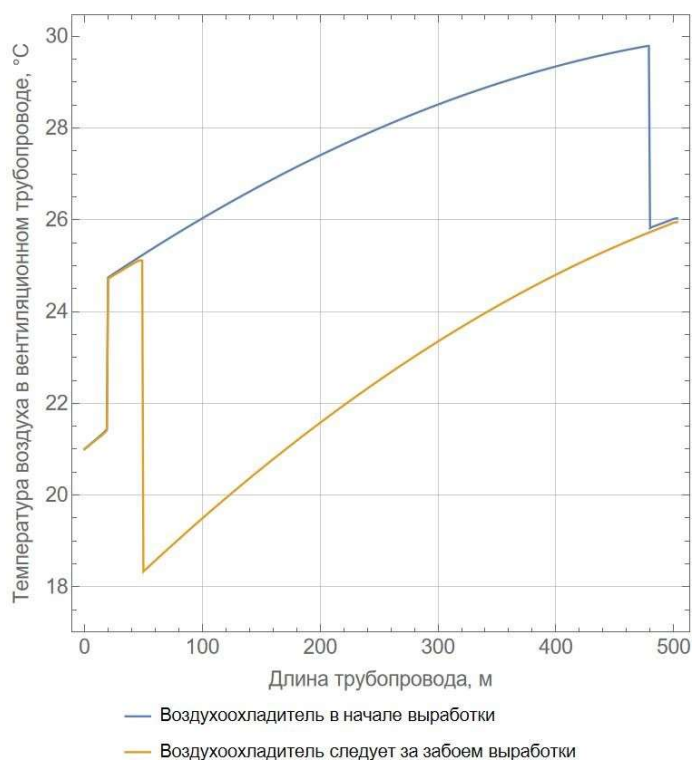


Рисунок 4.5 – Пример результатов моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе при различном месте расположения воздухоохладителя при условии обеспечения температуры воздуха 26 °C в забое выработки

На практике постоянное перемещение воздухоохладителя вслед за забоем, несмотря на большую энергетическую эффективность, является очень трудоемким мероприятием, тормозящим весь технологический процесс и снижающим надежность работы СКВ, поэтому оно применяется редко. Значительно чаще воздухоохладитель ставят сразу после вентилятора местного проветривания, в результате чего возникает необходимость теплоизоляции вентиляционного трубопровода.

Задача по теплоизоляции вентиляционного трубопровода сводится к определению толщины теплоизоляционного слоя на основе материалов, которые могут применять в руднике. Вентиляционный трубопровод должен иметь теплоизоляцию такой толщины, чтобы обеспечить:

- температуру воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода в максимальный период развития тупиковой выработки не выше 26 °C;
- возможность обеспечения системой кондиционирования такой температуры воздуха после воздухоохладителя, чтобы на выходе из вентиляционного трубопровода в максимальный период развития тупиковой выработки температура воздуха не превышала 26 °C;
- требуемую температуру воздуха в забое при ограниченной холодильной мощности в наличии;

- экономическую целесообразность применения;
- эксплуатационные зазоры между вентиляционным трубопроводом и оборудованием в выработке.

До начала подбора толщины теплоизоляции необходимо определить максимально возможный диаметр трубопровода, который поместится в выработке и обеспечит требуемые зазоры между ним и оборудованием в выработке. Затем для определения необходимости применения теплоизоляции на вентиляционном трубопроводе необходимо провести моделирование температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода на максимальный период развития тупиковой выработки (1800 м для рассматриваемого случая, см. рисунок 4.6) с охлаждением воздуха до 10 °С (или другой температурой, в зависимости от условий применения) после первого вентилятора.

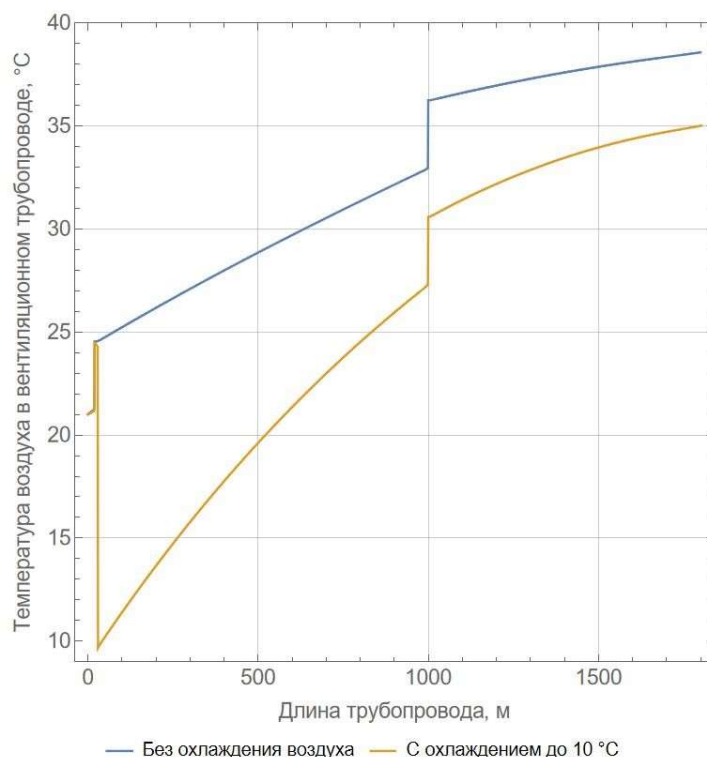


Рисунок 4.6 – Результаты моделирования температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода

Согласно полученным результатам, при мощности охлаждения 315 кВт температура воздуха в вентиляционном трубопроводе снижается с 24,8 °С до 10,0 °С вблизи устья выработки, при этом температуру воздуха в забое удалось снизить с 38,6 °С до 35,0 °С. Дальнейшее снижение температуры воздуха на воздухоохладителе затруднено, поэтому делается вывод о необходимости применения теплоизоляции. Для определения толщины теплоизоляции проводится многовариантное моделирование

температуры воздуха внутри теплоизолированного вентиляционного трубопровода (см. рисунок 4.7) с шагом толщины 5 мм (коэффициент теплопроводности принимается равным 0,07 Вт/(м·°С), что соответствует минеральной вате, степень черноты поверхностей остается без изменений).

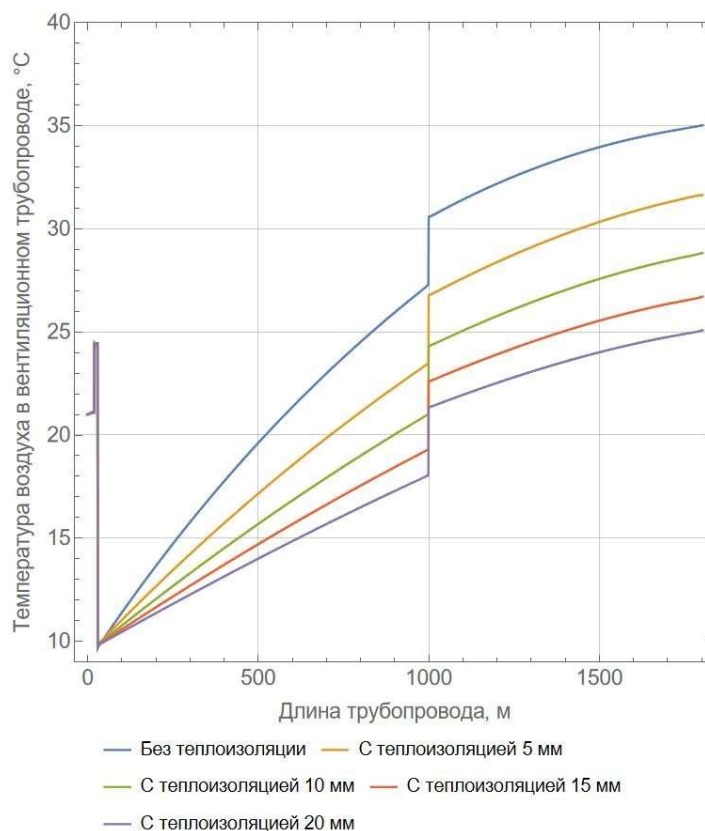


Рисунок 4.7 – Результаты моделирования температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода с применением воздухоохладителя и теплоизоляции

Согласно полученным результатам, при охлаждении воздуха до 10 °С в устье выработки для обеспечения температуры на выходе из вентиляционного трубопровода на уровне 25 °С необходимо применение теплоизоляции толщиной не менее 20 мм. Такая толщина теплоизоляции позволит обеспечить требуемую температуру подачи воздуха в забой в случае, если система кондиционирования была введена в работу на поздних этапах строительства выработки.

В случае, если трубопровод с данной толщиной теплоизоляции не помещается в выработку и снижать температуру воздуха после воздухоохладителя нет возможности, необходимо принять решение об увеличении сечения выработки или установки второй степени охлаждения.

Если сечение выработки позволяет дополнительно нарастить толщину теплоизоляции трубопровода, то необходимо выполнить технико-экономическое обоснование вариантов различных систем СКВ с различными требуемыми мощностями и толщиной теплоизоляции. Так же стоит помнить про возрастающий вес и объем

теплоизолированных трубопроводов, в результате чего их доставка и монтаж становятся сложными. Поэтому не рекомендуется использовать толщину теплоизоляции больше 50 мм.

4.3 Оценка снижения холодопроизводительности системы кондиционирования воздуха от растепления породного массива

В случае применения СКВ для охлаждения воздуха, подаваемого в выработку, интенсивность растепления породного массива увеличивается, что приводит к снижению интенсивности нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе, а следовательно и необходимой холодопроизводительности СКВ. Для оценки данного эффекта необходимо промоделировать развитие выработки с применением СКВ.

Первым этапом моделирования является определение времени запуска СКВ. Условием запуска СКВ воздуха является превышение температуры воздуха, подаваемого в забой, 26 °С. Для этого проводится расчет модели развития выработки с учетом применения теплоизолированного трубопровода, толщина теплоизоляции которого была определена ранее. Согласно результатам проведенного моделирования, при применении теплоизолированного трубопровода температура воздуха, подаваемого в забой, будет превышать 26 °С на расстоянии свыше 666 м (см. рисунок 4.8).

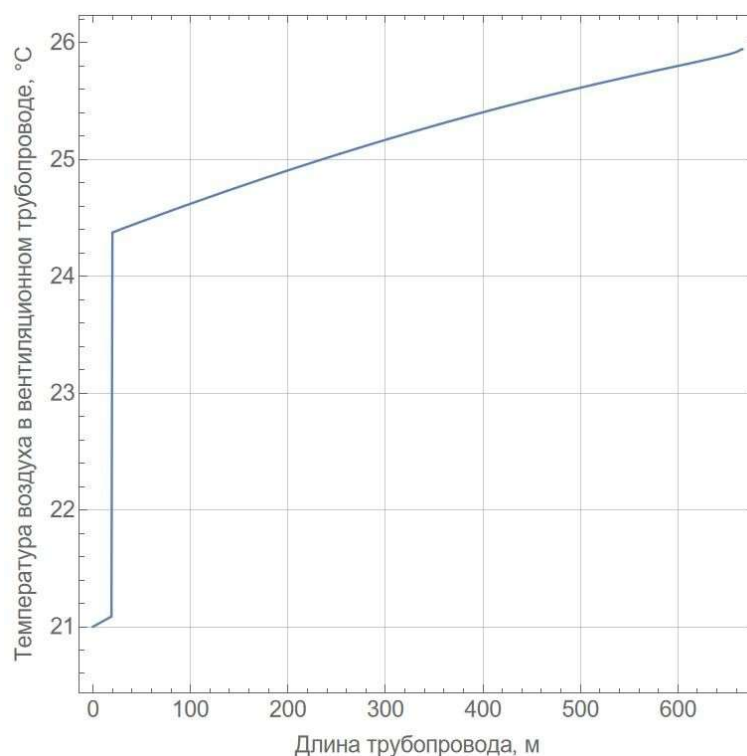


Рисунок 4.8 – График температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода с теплоизоляцией 20 мм при развитии выработки на 666 м

При дальнейшей проходке выработки температура воздуха, подаваемого в забой, будет превышать максимально допустимое значение 26 °C, поэтому на данном этапе необходим запуск СКВ.

Во втором этапе определяется режим работы СКВ. Наиболее экономически эффективным способом применения СКВ будет его использование таким образом, чтобы температура воздуха в забое выработки была на уровне 26 °C. В процессе определения требуемой мощности охлаждения воздуха для поддержания заданной температуры воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода было установлено, что она растет линейно. Поэтому, задачей моделирования теплораспределения в тупиковой выработке становится определение коэффициента приращения холодопроизводительности в день. Он определяется путем итерационного подбора, до тех пор, пока температура воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода на максимальный период развития не составит 26 °C. Приращение холодильной мощности составило 280 Вт в день. Согласно результатам моделирования (см. рисунок 4.9) такое приращение мощности позволяет обеспечить поддержание заданной температуры воздуха, подаваемого в забой. Исключением стал момент включения второго вентилятора, находящегося на удалении 1000 м от устья выработки, для компенсации тепловыделений которого (70 кВт) необходимо увеличить мощность охлаждения на 95 кВт. Мощность охлаждения больше мощности тепловыделений вентилятора по причине необходимости компенсации

повышенных холодопотерь в вентиляционном трубопроводе из-за более низкой температуры воздуха в трубопроводе.

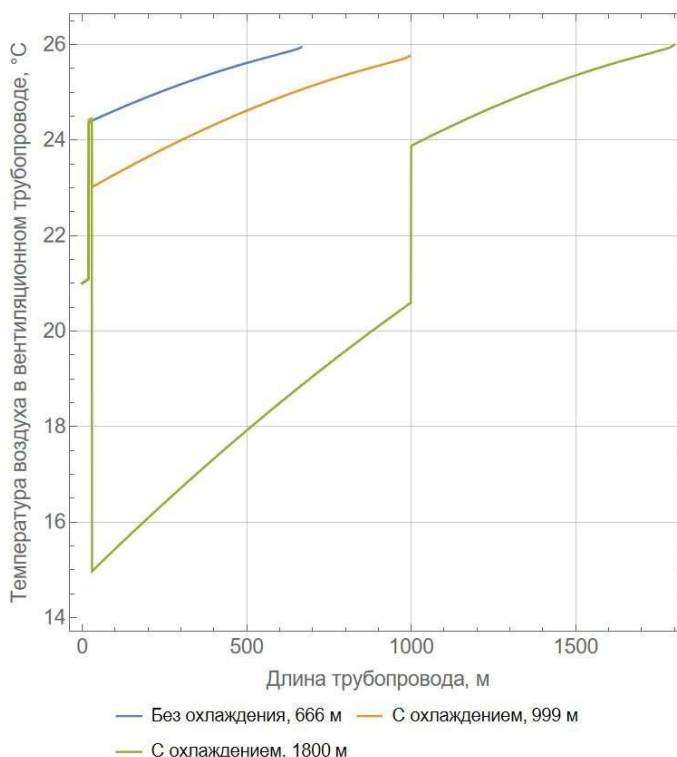


Рисунок 4.9 – График температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода с теплоизоляцией 20 мм при развитии выработки на 666 м, 999 м и 1800 м

В результате суммарная требуемая холодопроизводительность системы кондиционирования на конец строительства выработки при ее постоянной работе составила 201 кВт при охлаждении воздуха с 24,4 °C до 15,0 °C вместо 315 кВт, полученных ранее в разделе 4.2. Этот эффект приводит к снижению установочной мощности воздухоохладителей и холодильных машин, что позволит снизить капитальные и эксплуатационные затраты на кондиционирование при условии постоянной работы СКВ. В случае, если работы СКВ не предполагает постоянной работы, то мощность СКВ следует принять по результатам расчета, представленного в разделе 4.2.

Полученный вариант позволяет обеспечить минимальные эксплуатационные затраты при работе СКВ. Тем не менее, минимально возможная холодопроизводительность СКВ не достигается. Для обеспечения минимальной холодопроизводительности необходимо, чтобы СКВ работала с самого начала строительства тупиковой выработки с максимальной производительностью, тогда окружающий породный массив успеет сильнее растеплиться и позволит достичь необходимой температуры воздуха при меньшей максимальной холодопроизводительности СКВ.

Для определения требуемой холодопроизводительности данного варианта необходимо подобрать такую холодопроизводительность СКВ, чтобы температура воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода при максимальном развитии составила 26 °С. Результаты моделирования температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе для данного случая приведены на рисунке 4.10.

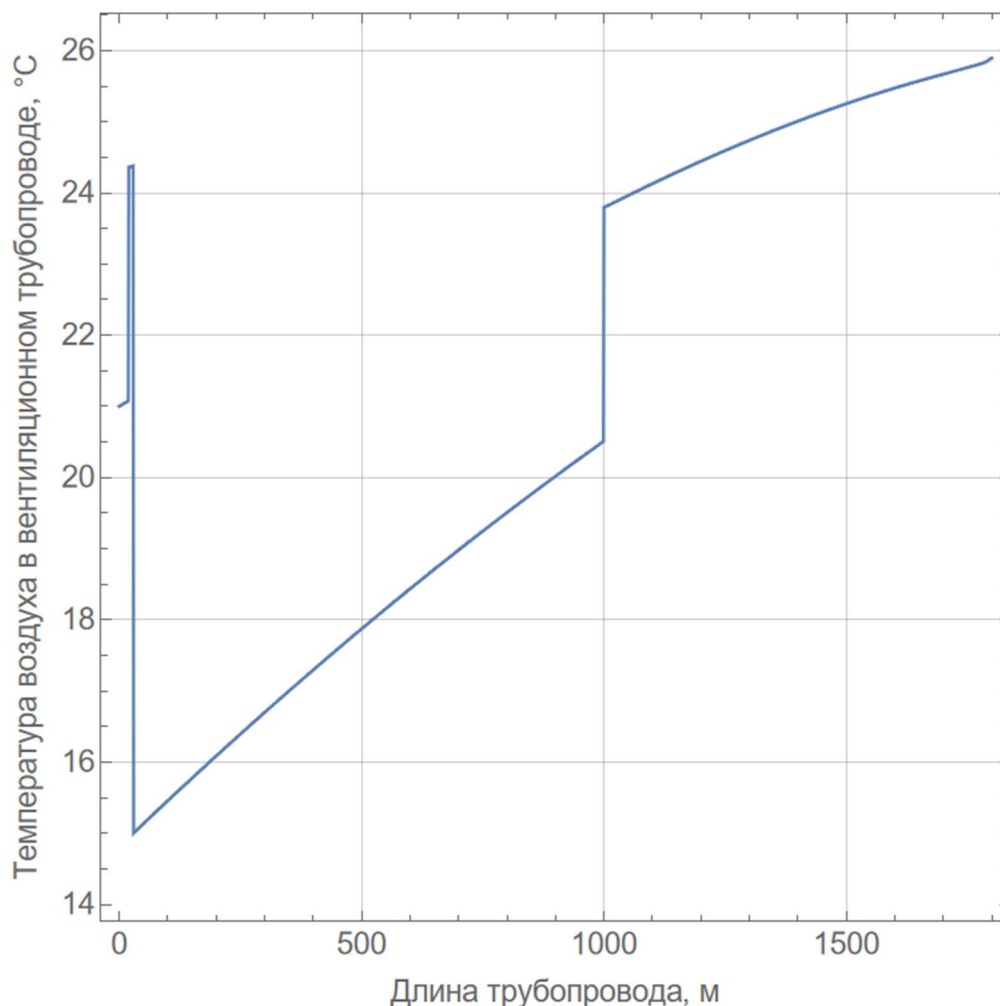


Рисунок 4.10 – График температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода с теплоизоляцией 20 мм при развитии выработки на 1800 м и работающей СКВ с постоянной мощностью

По результатам проведенных расчётов требуемая холодопроизводительность снизилась до 197 кВт. В данном случае эффект от растепления породного массива оказался несущественным. Это может быть связано с достаточно большой протяженностью выработки и наличием теплоизоляции на трубопроводе. Из-за большой протяженности выработки температура исходящего воздуха в устье постепенно поднимается и в определенный момент тепловыравнивающая рубашка может начать сужаться, что приводит к снижению эффекта растепления породного массива. Наличие теплоизоляции на вентиляционном трубопроводе существенно снижает лучистый

теплообмен с породным массивом, что так же существенно снижает скорость растепления породного массива. Таким образом, можно сделать вывод, что данный расчет целесообразно проводить для коротких тупиковых выработок, где применение теплоизоляции вентиляционного трубопровода не обязательно.

4.4 Выводы по главе

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- холодильная мощность воздухоохладителей возрастает при увеличении давления воздуха. Причинами роста холодильной мощности являются увеличение плотности воздуха и температуры «точки росы»;
- предложен новый способ расчета местных СКВ с учетом применения теплоизолированных вентиляционных труб, позволяющий обеспечить требуемой температурой воздуха рабочие зоны протяженных тупиковых выработок;
- предложен новый способ расчета местных СКВ, учитывающий растепление породного массива от работы СКВ, позволяющий существенно снизить значение требуемой холодопроизводительности.

Полученные результаты данного раздела и раздела 3 позволяют разработать методику подбора местных систем управления тепловым режимом глубоких тупиковых выработок.

5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

5.1 Методика разработки систем управления тепловым режимом в тупиковых горных выработках

Для прикладного использования разработанной в главе 2 математической модели и полученных выводов в главах 3 и 4 разработана методика подбора технических решений, позволяющих обеспечить допустимые микроклиматические условия в забое тупиковой горной выработке глубокого рудника.

Методика принятия технических решений для обеспечения допустимых микроклиматических условий в забое тупиковых горных выработок глубоких рудников разделена на следующие этапы:

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

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.

5.1.1 Построение математической модели тупиковой горной выработки

Для постройки математической модели необходимо собрать исходные данные, которые должны включать:

- длину тупиковой выработки при максимальном развитии;
 - температуру нетронутого породного массива, где будет проходить выработка;
 - геометрические размеры горной выработки и вентиляционного трубопровода;
 - требуемый объем воздуха для проветривания выработки;
 - параметры вентилятора местного проветривания (далее ВМП) (расчётное давление, расход воздуха и мощность электродвигателя);
 - количество и мощность работающей в выработке СДО и электрооборудования, а также их местоположение;
 - давление, температура и относительная влажность воздуха на входе ВМП.
- Определяются на основе моделирования (например, с помощью программного комплекса «Аэросеть») или на основе экспериментальных данных;

- степень черноты вентиляционного трубопровода и стенки выработки;
- теплофизические свойства породного массива (теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность);
- скорость движения забоя в сутки.

Для обеспечения температуры в призабойной части выработки ниже 26 °С необходимо подавать воздух с более низкой температурой. Требуемая температура воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода должна определяться на основе моделирования воздухораспределения в тупиковой части со свежооголенной породой, но составлять не более 25 °С.

Горные машины и электрооборудование задаются в тепловой модели как местные источники тепловыделения с мощностью, определяемой выражением

$$\frac{dQ}{dt} = \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right) N(t),$$

где $N(t)$ – полезная мощность машины или оборудования, может быть величиной постоянной или периодической функцией времени; η – коэффициент полезного действия привода машины или оборудования.

Радиус теплового влияния определяется по формуле:

$$R = \sqrt{4\chi\tau \cdot \ln\left(\frac{s \cdot \Delta T_0}{0,4 \cdot \pi \cdot \chi \cdot \tau}\right)},$$

где χ – температуропроводность горных пород (м²/с); τ – общее время расчета (с); ΔT_0 – максимальная разница температур между начальной температурой воздуха и естественной температурной горных пород (°С); s – поверхность стенок выработки единичной длины (м²).

Полученные значения параметров вносятся в модель. Далее производится серия тестовых расчетов, в результате которых определяются шаги по времени и пространству таким образом, чтобы их влияние на результат при минимальном времени расчета отсутствовало. После определения значения шагов по времени и пространству производится расчет модели.

5.1.2 Определение эффективности горнотехнических методов обеспечения допустимых микроклиматических условий

После расчета модели на максимальное развитие определяется, есть ли превышение максимально допустимой температуры воздуха в забое выработки. В случае если его нет, разработки технических решений по нормализации микроклимата в

тупиковой выработке не требуется. В случае, если есть превышение температуры воздуха в забое выработки, определяются следующие параметры:

- нагрев воздуха от теплообмена с трубопроводом и от работы ВМП;
- превышение температуры воздуха в забое над максимально допустимой;
- разница между максимально допустимой температурой и температурой воздуха на входе ВМП.

Далее производится анализ полученной информации. Если температура воздуха перед ВМП выше 23 °С, то производится расчет СКВ. Если температура воздуха перед ВМП ниже 23 °С, то производится расчет теплотехнических способов снижения температуры воздуха.

Увеличение диаметра

Если температура воздуха после ВМП составляет больше 24 °С и нагрев превышает 1 °С, то необходимо увеличить диаметр вентиляционного трубопровода и сохранить расход вентилятора на прежнем уровне при помощи частотного регулирования. В случае отсутствия частотных преобразователей для регулировки расхода воздуха производится замена на ВМП меньшей мощности. Если замена ВМП невозможна или увеличить трубопровод невозможно из-за ограниченного размера выработки, то выполняется расчет СКВ.

Для определения эффекта снижения нагрева воздуха на вентиляторе можно воспользоваться формулой:

$$\Delta T_2 = \frac{\Delta T_1 \cdot d_1^5}{d_2^5}, \quad (5.1)$$

где ΔT_1 – текущий нагрев воздуха на вентиляторе, °С;

d_1 – текущий диаметр вентиляционного трубопровода, м;

d_2 – увеличенный диаметр трубопровода, м.

Увеличивать диаметр трубопровода необходимо пошагово на основе размеров, выпускаемых производителем. Диаметр трубопровода необходимо увеличивать, пока воздух нагревается на ВМП более, чем на 1 °С.

После подбора нового диаметра трубопровода, в модель вносятся соответствующие корректировки мощности вентилятора (см. формулы 3.3 и 3.4) и диаметра вентиляционного трубопровода, после чего модель пересчитывается. Если нагрев воздуха на ВМП удалось снизить до значения равного или меньше 1 °С, но температура воздуха в забое превышает требуемые значения, то переходят к следующему этапу.

Снижение степени черноты

Если температура воздуха после ВМП меньше 24 °С или увеличение диаметра вентиляционных трубопроводов оказывается недостаточным для снижения температуры воздуха, подаваемого в забой, до необходимых значений, то следующим этапом является снижение степени черноты вентиляционного трубопровода. Наиболее подходящими для этого материалами могут стать оцинкованная сталь ($\varepsilon = 0,23$) и алюминиевая фольга ($\varepsilon = 0,04$). Диаметр вентиляционного трубопровода сохраняется из предыдущего этапа, а значение степени черноты корректируется и модель пересчитывается.

Определение толщины теплоизоляции

Если снижение степени черноты вентиляционного трубопровода оказывается недостаточным, то определяется толщина теплоизоляции путем многовариантного моделирования с шагом толщины 5 мм от 0 до 50 мм. Коэффициент теплопроводности принимается по паспортным характеристикам применяемой теплоизоляции. Дальнейшее увеличение толщины теплоизоляции приводит к значительному утяжелению трубопроводов и сложности их монтажа, однако при особых условиях допустимо применять теплоизоляцию с большей толщиной. При определении толщины теплоизоляции необходимо помнить об ограничениях максимально допустимых размеров вентиляционного трубопровода.

При расчете модели диаметр воздуховода берется из предыдущего этапа, а степень черноты необходимо применять для материала внешнего слоя. Если применение теплоизоляции не позволило достичь требуемых температур, применяют систему кондиционирования.

5.1.3 Определение холодопроизводительности системы кондиционирования воздуха

В случае, если горнотехническими способами достичь допустимой температуры воздуха, подаваемого в забой, не представляется возможным, применяется система кондиционирования воздуха. Разработка начинается без учета ранее разработанных горнотехнических способов.

Холодопроизводительность воздухоохладителей и холодильных машин, расположенных близко к воздухоохладителям, определяется по формуле:

$$Q_{x,i} = L \cdot \rho \cdot (i_{\text{нач}} - i_{\text{кон}}) \text{ кВт}, \quad (5.2)$$

где L – требуемый расход воздуха, м³/с;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

$i_{\text{нач}}$ – энтальпия влажного воздуха перед воздухоохладителем, кДж/кг;

$i_{\text{кон}}$ – энтальпия воздуха после воздухоохладителя, кДж/кг.

В случае, если холодильная машина находится на значительном расстоянии, для определения её мощности необходимо использовать формулу:

$$Q_{x,i} = L \cdot \rho \cdot (i_{\text{нач}} - i_{\text{кон}}) + \sum K_{\text{тр}} \cdot F_{\text{тр}} \cdot \Delta t_{\text{ср}} + \sum q_{\text{нас}} \text{ кВт}, \quad (5.3)$$

где $K_{\text{тр}}$ – коэффициент теплопередачи от труб циркуляционного контура к воздуху в выработках, Вт/(м²·°C); $F_{\text{тр}}$ – площадь поверхности труб циркуляционного контура, м²; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средний температурный напор, между водой в трубах и воздухом в выработках; $q_{\text{нас}}$ – тепловыделения циркуляционных насосов, поступающие в циркуляционный контур, кВт.

Энтальпии влажного воздуха зависят от температуры и относительной влажности и определяются по i - d диаграммам соответствующего барометрического давления. Энтальпия воздуха на входе в воздухоохладитель задается на основании экспериментальных данных или данных, полученных при моделировании теплораспределения в руднике, а также учитывает нагрев воздуха от ВМП (при расчете учитывается дополнительный нагрев от возросшего сопротивления сети по причине установки ВО).

Энтальпия воздуха на выходе из воздухоохладителя определяется на основе средней температуры поверхности воздухоохладителя и температуры воздуха после воздухоохладителя, определенной при моделировании теплораспределения в тупиковой выработке.

Температура воздуха после воздухоохладителя определяется путем многовариантного моделирования теплораспределения на максимальный период развития выработки при условии первого запуска СКВ при максимальном развитии выработки. Окончание расчета происходит при достижении температуры воздуха, подаваемого в забой, ниже 26 °C, при этом минимальная температура воздуха на воздухоохладителе не должна опускаться ниже 10 °C.

В случае, если при охлаждении до 10 °C обеспечить подачу воздуха в забой с температурой ниже 25 °C не получается, необходимо применение трубопроводов со сниженным значением степени черноты (из оцинкованной стали ($\varepsilon = 0,23$) или алюминиевой фольги ($\varepsilon = 0,04$)).

Если снижение степени черноты вентиляционного трубопровода оказывается недостаточным, то определяется толщина теплоизоляции, путем многовариантного моделирования с шагом толщины 5 мм от 0 до 50 мм. Дальнейшее увеличение толщины

теплоизоляции приводит к значительному утяжелению трубопроводов и сложности их монтажа, однако при особых условиях допустимо применять теплоизоляцию с большей толщиной. При определении толщины теплоизоляции необходимо проверить ограничения максимально допустимого размера вентиляционного трубопровода.

Данным способом определяется максимально необходимая мощность СКВ, при которой возможно обеспечить заданную температуру воздуха (25 °С) на выходе из вентиляционного трубопровода. В случае, если требуемая температура обеспечена, а габариты выработки позволяют дополнительно увеличить размер вентиляционного трубопровода и нагрев воздуха в трубопроводе превышает 5 °С, необходимо при максимально возможной толщине теплоизоляции определить холодопроизводительность СКВ или подобрать толщину теплоизоляции при которой нагрев воздуха в трубопроводе не будет превышать 5 °С. Такой вариант позволяет обеспечить заданную температуру воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода при начале работы СКВ на любом этапе строительства выработки. Его необходимо принимать в случае, если существуют риски существенной задержки переноса ВО в новые рабочие зоны или предусмотрено применение СКВ «по требованию».

Применение СКВ «по требованию» предполагает охлаждение выработки только при ведении в них работ, требующих снижения температуры воздуха. К таким работам могут относиться работа людей и техники без системы кондиционирования кабины. В случае, если техника, работающая в выработке, оснащена системой кондиционирования кабины, то работа СКВ тупиковой выработки не предусматривается. Кроме того, в случае работы СКВ «по требованию», может изменяться расход воздуха в тупиковой выработке, в зависимости от типа проводимых в ней работ.

Таким образом, применение СКВ «по требованию» позволяет существенно снизить эксплуатационные издержки, а в случае применения с вентиляцией по требованию позволяет снизить требуемую холодопроизводительность СКВ за счет снижения объема охлаждаемого воздуха, что снижает её стоимость.

Однако такой метод подбора СКВ, работающих постоянно, не позволяет подобрать наиболее экономически эффективный вариант, так как в нем не учитывается дополнительное растепление породного массива от работы СКВ.

Наиболее экономически эффективным вариантом СКВ необходимо считать тот вариант, который имеет минимальную стоимость жизненного цикла. В стоимость жизненного цикла входят капитальные и эксплуатационные затраты, а также затраты на обслуживание.

Учет эффекта растепления породного массива позволяет применять СКВ с меньшими значениями холодопроизводительности или эксплуатационных затрат. Однако для этого необходим высокий уровень организованности работ, позволяющий запускать СКВ на ранних стадиях строительства выработки.

Определение минимально необходимой мощности СКВ требуется, когда более мощные варианты имеют проблемы с отводом тепловыделений, отсутствием требуемых подводимых электрических мощностей, отсутствием пространства для размещения, а применение СКВ «по требованию» по тем или иным причинам невозможно. Необходимо учитывать, что такой вариант требует высокого уровня организации работ.

Для определения минимально необходимой мощности СКВ сначала путем многовариантного моделирования подбирается наиболее эффективная комбинация увеличения диаметра вентиляционного трубопровода и толщины его теплоизоляции. Наиболее эффективной комбинацией будет тот вариант, который позволит максимально снизить температуру на выходе из вентиляционного трубопровода в рамках существующих габаритных ограничений.

Далее, с подобранной комбинацией производится следующая серия моделирования, целью которой является определение минимальной мощности СКВ, при постоянной работе которой с момента начала строительства выработки к концу строительства из вентиляционного трубопровода выходит воздух с заданной температурой (25 °С). При этом СКВ постоянно должна работать на максимальной мощности.

Данный вариант в большинстве случаев позволяет обеспечить минимальные капитальные затраты, однако из-за постоянной работы СКВ на максимальной мощности, эксплуатационные затраты достаточно высоки и не позволяют однозначно назвать этот вариант наиболее экономически эффективным.

Наименьшие эксплуатационные затраты будут иметь те СКВ, которые начинают работать в тот момент, когда температура воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода начинает превышать заданную, и в процессе движения забоя постепенно наращивают свою производительность. Производительность СКВ необходимо наращивать таким образом, чтобы температура на выходе из трубопровода была постоянной и равнялась заданной. Комбинация диаметра и толщины теплоизоляции вентиляционного трубопровода подбирается таким же образом как в 5.1.2. Для определения производительности СКВ необходимо определить, какая мощность требуется для охлаждения воздуха в конце строительства выработки, чтобы на выходе из трубопровода температура воздуха равнялась заданной.

Такой вариант позволяет обеспечить минимальные эксплуатационные затраты и наряду с вариантом, снижающим капитальные затраты, может оказаться наиболее экономически эффективным. Для выбора наиболее экономически целесообразного варианта необходимо выполнить технико-экономическое обоснование (ТЭО).

5.2 Разработка программы расчета микроклиматических параметров в тупиковых выработках

В качестве моделируемой выработки выбрана РВ-2 на строящемся руднике в Норильском промышленном районе. Её принципиальная схема представлена на рисунке 5.1. Данная выработка должна соединить два ствола ВС-10 и СКС-1 между собой, 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 ВС-10 температура воздуха из вентиляционного трубопровода на сопряжении ствола с выработкой РВ-2 является постоянной и составляет 21 °С. Эта особенность позволила сократить область моделирования и не учитывать теплообмен происходящий в стволе ВС-10. Движение воздуха по выработке РВ-2 осуществляется по вентиляционному трубопроводу диаметром 1,2 м с помощью двух вентиляторов местного проветривания (ВМП), один из которых расположен в начале выработки, а второй на расстоянии 1000 м от устья. Температура нетронутого окружающего породного массива достигает 47 °С. Остальные характеристики выработки, учитываемые при моделировании представлены в таблице 5.1.

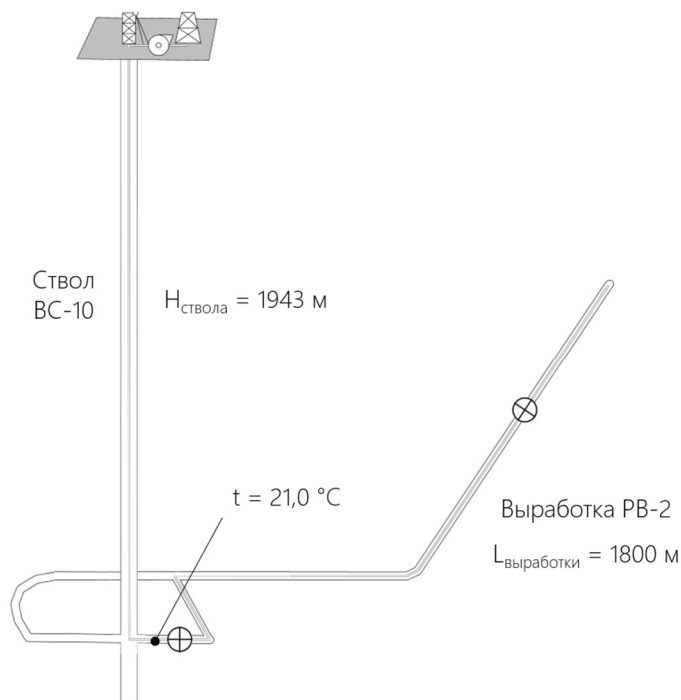


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема выработки РВ-2

Таблица 5.1 – Параметры моделируемой выработки

№ п/п	Параметр	Значение
1.	Сечение выработки	15,3 м ³
2.	Диаметр / сечение вентиляционного трубопровода	1,2 м / 1,13 м ³
3.	Максимально возможный размер вентиляционного трубопровода	1,4 м
4.	Максимальная длина выработки	1800 м
5.	Температура подаваемого воздуха	21,0 °С
6.	Влагосодержание подаваемого воздуха	9,6 г/кг
7.	Температура нетронутых пород	47,0 °С
8.	Барометрическое давление	124 000 Па
9.	Теплоемкость воздуха	1005 Дж/кг·°С
10.	Плотность воздуха (усредненная)	1,41 кг/м ³
11.	Расход воздуха	15,4 м ³ /с
12.	Теплоемкость пород	539 Дж/кг·°С
13.	Теплопроводность пород	5,16 Вт/м·°С
14.	Плотность пород	4010 кг/м ³
15.	Температуропроводность	2,386·10 ⁻⁶ м ² /с
16.	Степень черноты вентиляционного трубопровода	0,945
17.	Степень черноты стенок выработки	0,72
18.	Скорость движения забоя	3 м/сут
19.	Тепловыделения от ВМП	75 кВт
20.	Количество ВМП	2 шт.
21.	Тепловыделения от ПДМ	74 кВт
22.	Период работы ПДМ	Каждые 12 ч
23.	Удельное поглощение тепла от испарения	200 Вт/м
24.	Радиус теплового влияния выработки	21,5 м
25.	Время расчета	51 840 000 с
26.	Средняя температура поверхности воздухоохладителя	7,0 °С

Особенностью данной выработки, является то, что в ней ведутся работы с применением воды, которая оказывает влияние на формирование микроклиматических параметров в выработке. Для их учета, в модель введен распределенный источник холода мощностью 200 Вт/м, мощность которого определена на основе ранее выполненных

экспериментальных исследований в аналогичных выработках. Данный источник холода снижает температуру поверхности породного массива, в результате чего интенсивность нагрева воздуха в выработке несколько снижается.

Перечисленные параметры вносятся в программу расчета. Интерфейс программы представлен на рисунке 5.2.

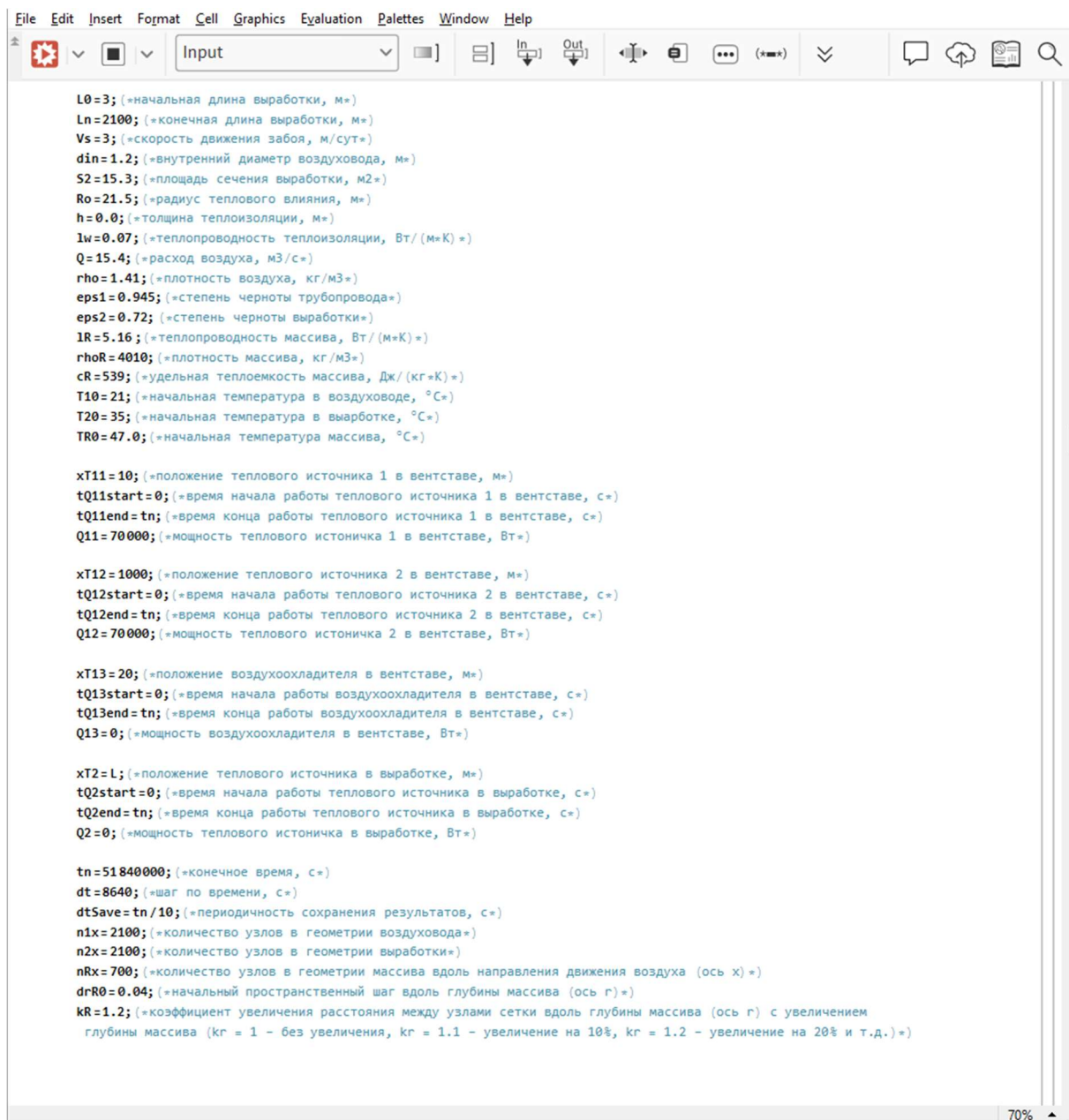


Рисунок 5.2 – Интерфейс программы расчёта

Далее запускается расчет с помощью команды Evaluate Notebook во вкладке Evaluation (см. рисунок 5.3).

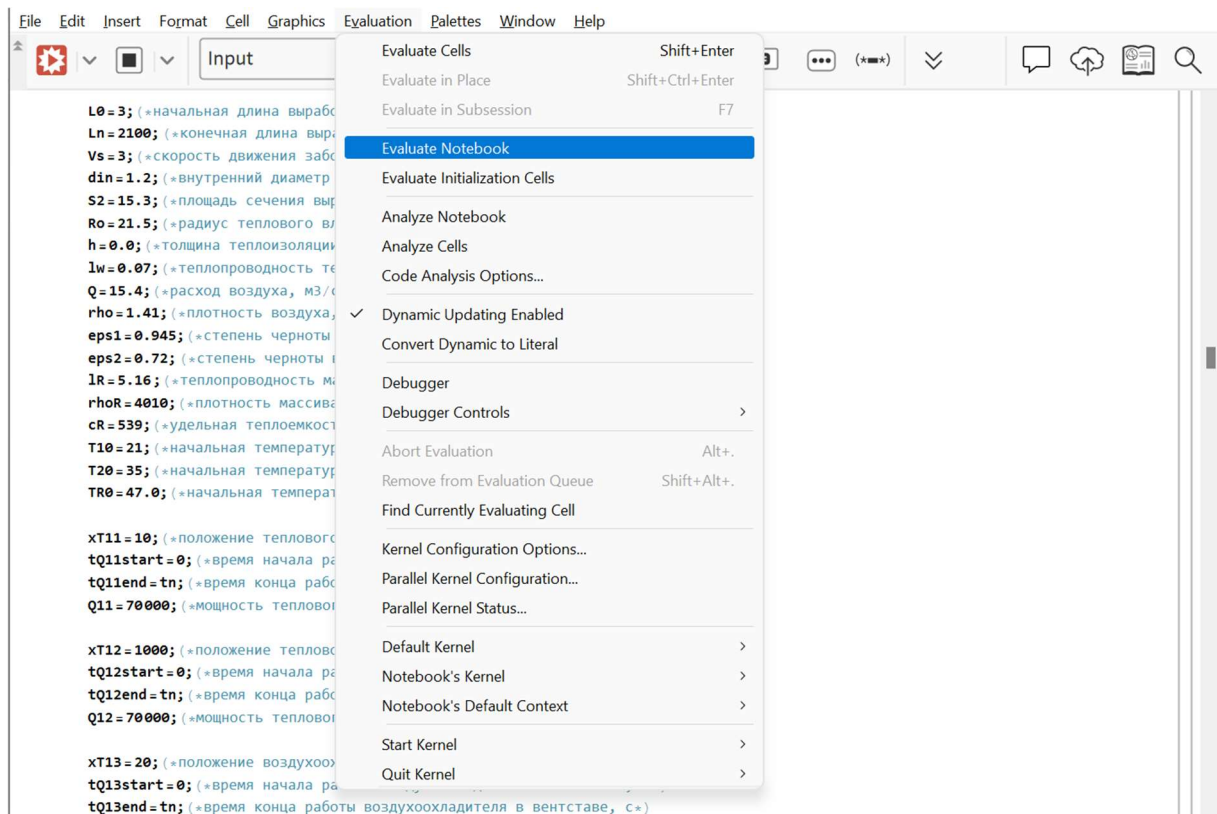


Рисунок 5.3 – Запуск программы расчёта

После выполнения расчета теплораспределения в тупиковой выработке программа выдает результаты в графическом виде (см. рисунки 5.4 и 5.5), которые при необходимости могут быть выгружены в виде табличных данных.

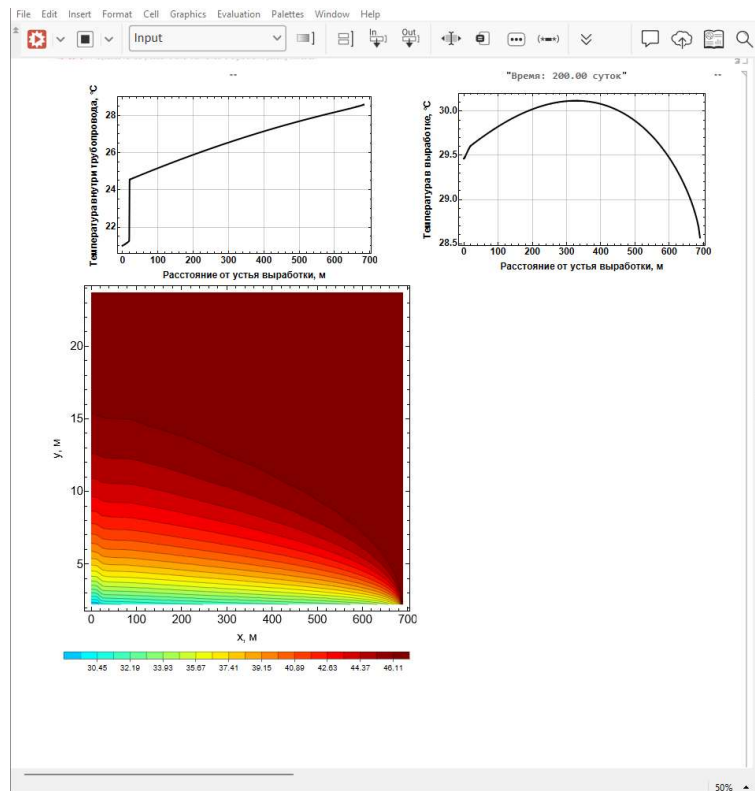


Рисунок 5.4 – Графические результаты расчета теплораспределения в тупиковой выработке с графиком температуры в вентиляционном трубопроводе, в выработке и теплораспределения в породном массиве по длине

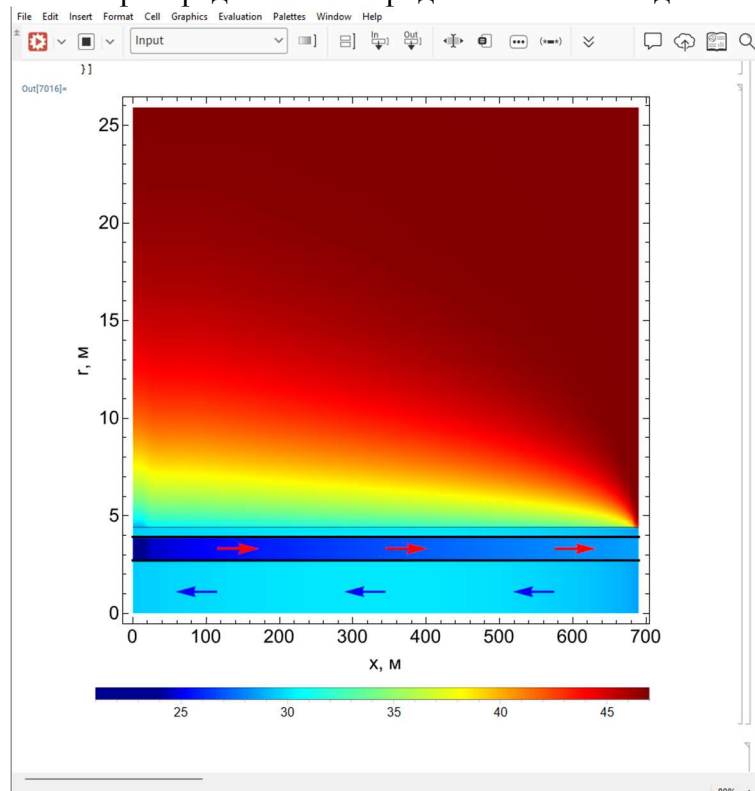


Рисунок 5.5 – Графические результаты расчета теплораспределения в тупиковой выработке в сечении по длине со схематическим изображением выработки, вентиляционного трубопровода и породного массива

На основе полученных результатов производится анализ, после которого при необходимости в исходные данные модели вносят корректировки и модель пересчитывается.

Модель позволяет сохранять расчётное теплораспределение и продолжать расчёт с новыми граничными условиями (например температурой воздуха, теплоизолированными трубопроводами, включенной СКВ и т. д.), что позволяет учитывать фактор предыстории при необходимости.

5.3 Разработка технических решений по нормализации микроклиматических условий при строительстве выработки РВ-2 в Норильском промышленном районе

Расчётное теплораспределение в выработке без технических решений представлено на рисунках 5.6 и 5.7.

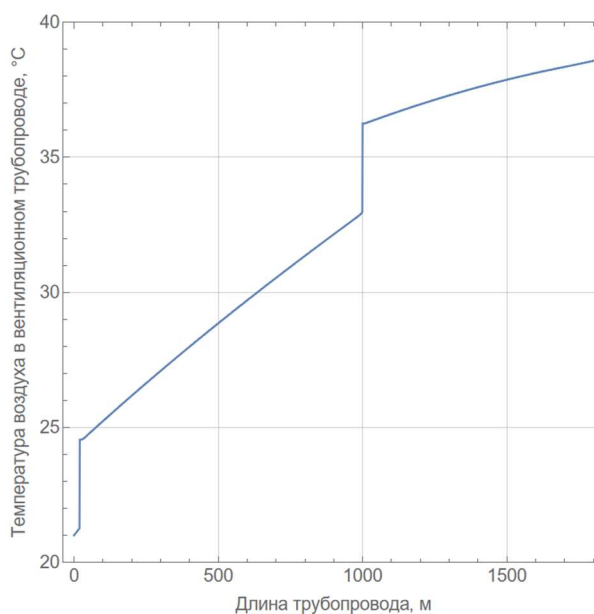


Рисунок 5.6 – График температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе

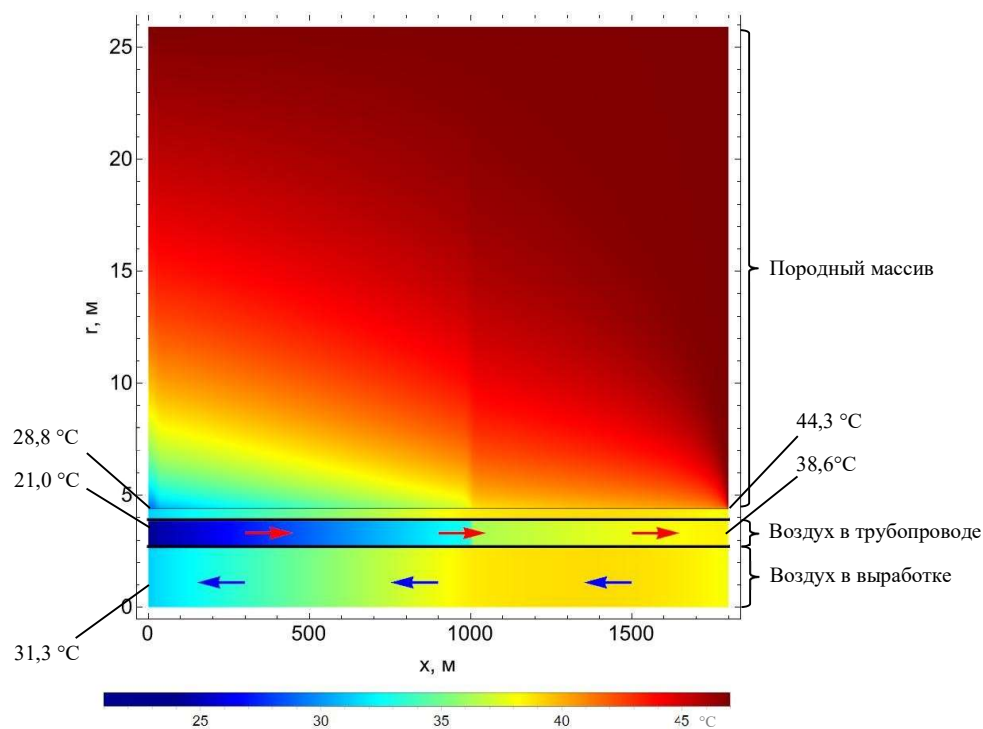


Рисунок 5.7– Модельное теплораспределение в тупиковой выработке

Согласно полученным результатам, температура воздуха в забое превышает требуемую температуру 26 °С, при этом температура воздуха на входе в выработку составляет меньше 23 °С, что позволяет применять теплотехнические способы снижения температуры воздуха согласно методике.

5.3.1 Расчет теплотехнических способов

Нагрев воздуха на каждом вентиляторе составляет 3,3 градуса, что гарантировано приводит к температуре после ВМП выше 24,0 °С, что свидетельствует о необходимости снижения нагрева путем увеличения диаметра вентиляционного трубопровода. Согласно формуле (5.1) для снижения нагрева до 1,5 °С на вентиляторе необходимо увеличить диаметр трубопровода с 1,2 м до 1,4 м, что позволит снизить суммарный нагрев от вентиляторов до 3,0 °С и суммарную температуру после вентиляторов до 24,0 °С. Результаты прогнозного теплораспределения в выработках представлены на рисунках 5.8 и 5.9.

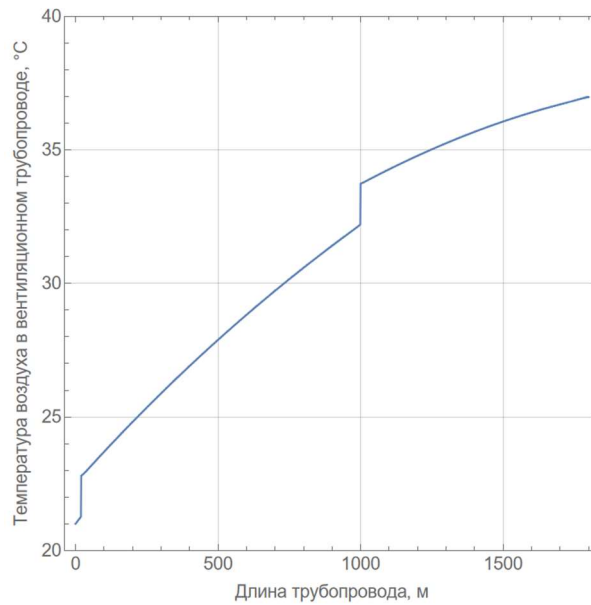


Рисунок 5.8 – График температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе при увеличении диаметра до 1,4 м

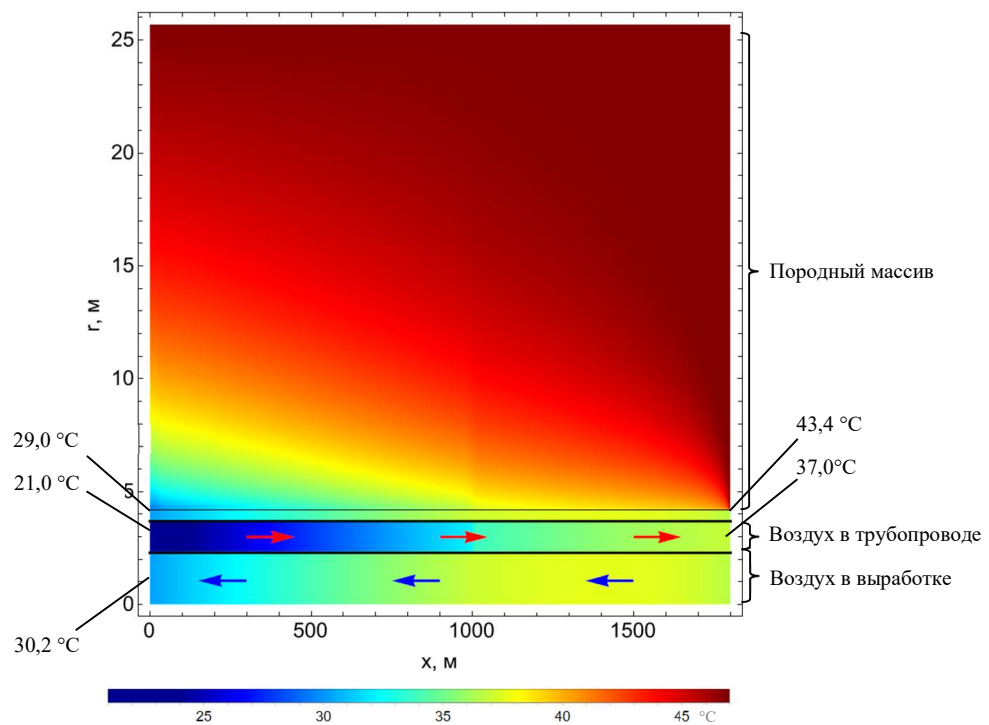


Рисунок 5.9 – Модельное теплораспределение в тупиковой выработке при увеличенном диаметре вентиляционного трубопровода до 1,4 м

Согласно полученным результатам, увеличение диаметра вентиляционного трубопровода позволило снизить температуру на выходе из вентиляционного трубопровода с 38,6 °C до 37,0 °C, что выше необходимых 25 °C. Таким образом, необходимо выполнить расчет теплораспределения со сниженной степенью черноты вентиляционного трубопровода. В качестве материала внешней поверхности

трубопровода выбираем алюминиевую фольгу со степенью черноты $\varepsilon = 0,04$. Результаты моделирования приведены на рисунках 5.10 и 5.11.

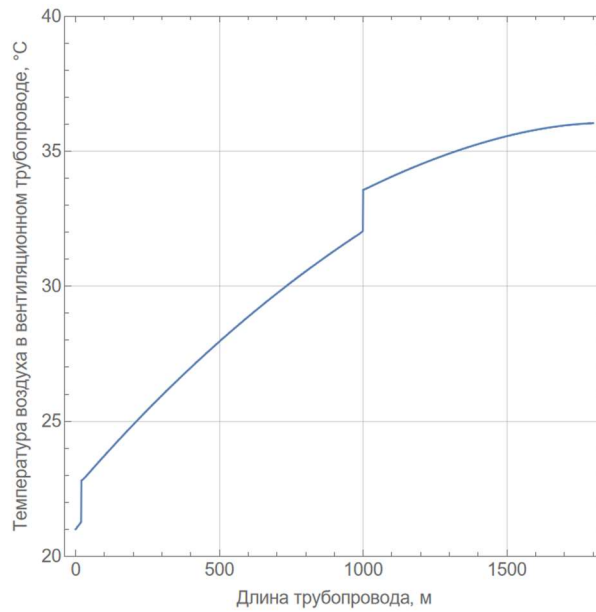


Рисунок 5.10 – График температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе

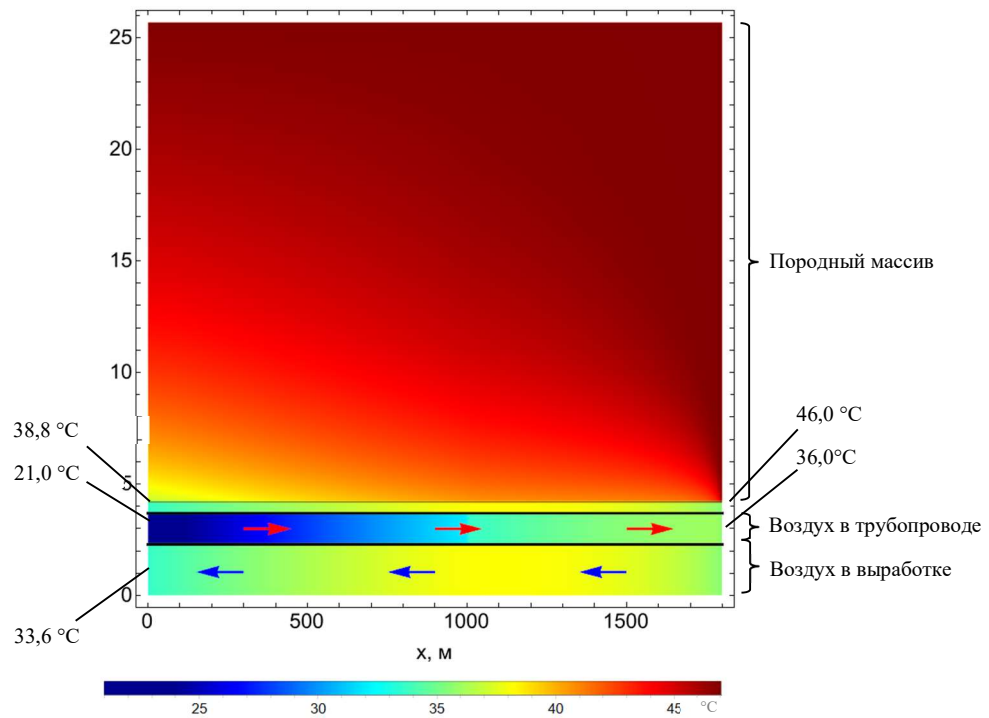


Рисунок 5.11 – Модельное теплораспределение в тупиковой выработке

Согласно полученным результатам, применение вентиляционного трубопровода со сниженной степенью черноты приводит к дополнительному снижению нагрева воздуха на 1 °C и температура на выходе становится равной 36 °C. Однако данная температура по-прежнему существенно превышает необходимую. Так как нагрев воздуха на ВМП без увеличения диаметра трубопровода однозначно приводит к нагреву

воздуха выше 26 °С, а с трубопроводом диаметром 1,4 м отсутствует возможность применения теплоизоляции ввиду ограниченного пространства в выработке, возможность снижения нагрева путем применения теплоизоляции не рассматривается, поэтому необходимо выполнить расчет СКВ.

5.3.2 Расчет местной системы кондиционирования воздуха

Расчет СКВ начинается с моделирования теплораспределения при включении воздухоохладителя на максимальном периоде развития выработки и охлаждении воздуха до 10 °С после ВМП. Результаты расчета теплораспределения представлены на рисунках 5.12 и 5.13.

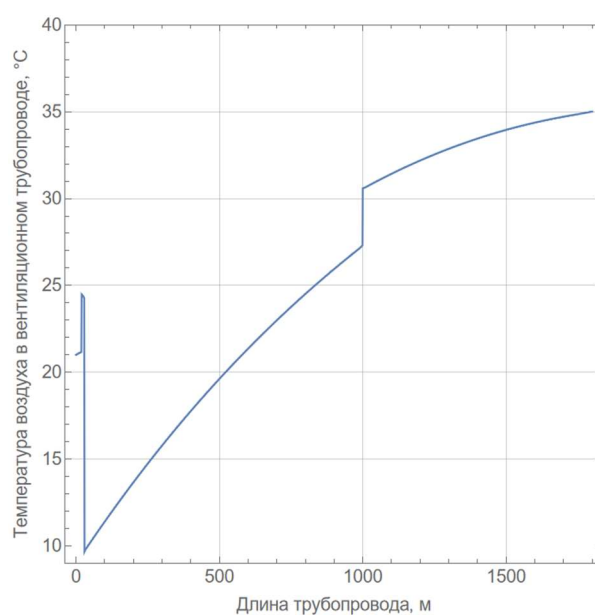


Рисунок 5.12 – График температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе при работающей СКВ

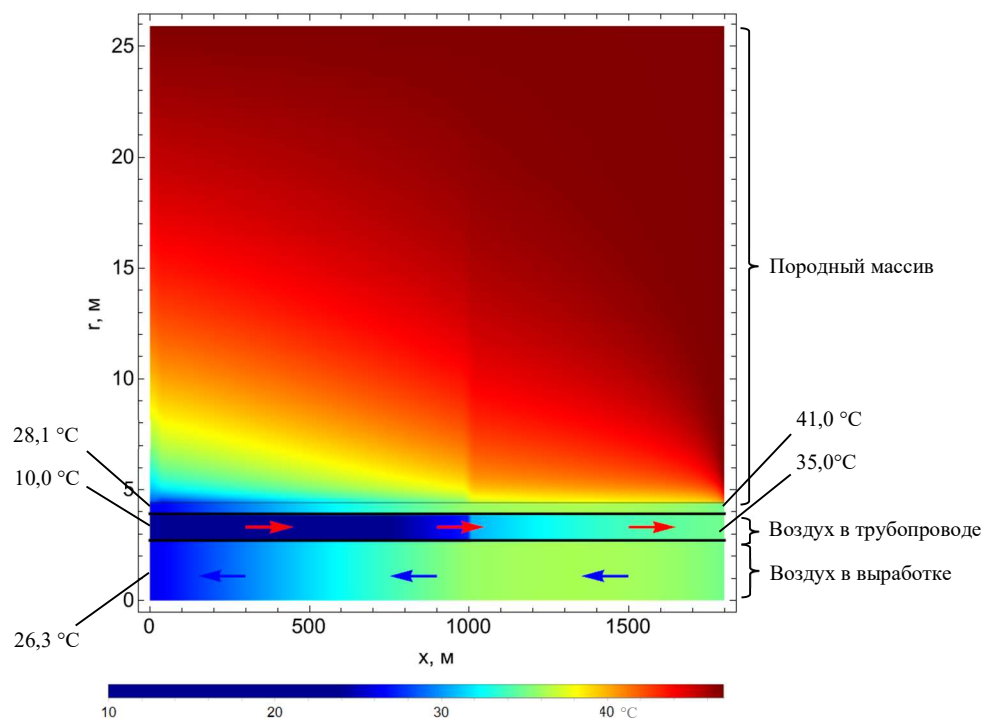


Рисунок 5.13 – Модельное теплораспределение в тупиковой выработке при работающей СКВ

Согласно полученному результату, охлаждение воздуха до температуры 10 °С после ВМП недостаточно для подачи в забой воздуха с температурой 25 °С. Для снижения интенсивности нагрева применяем вентиляционные трубопроводы со сниженным значением степени черноты. В качестве материала внешнего слоя применяем алюминиевую фольгу. Результаты моделирования приведены на рисунках 5.14 и 5.15.

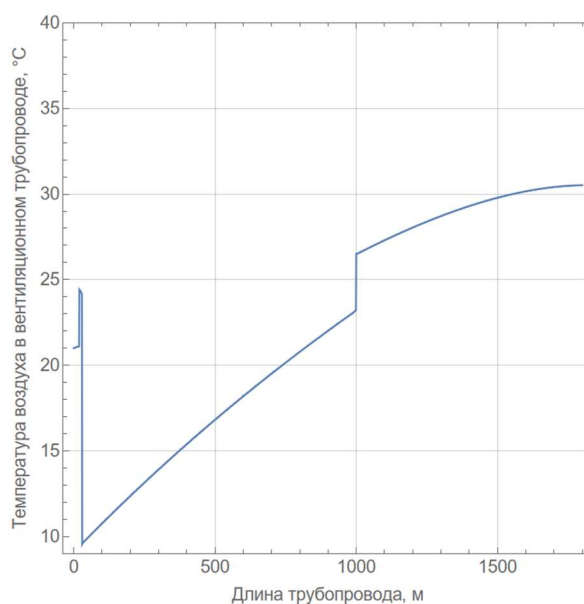


Рисунок 5.14 – График температуры воздуха в вентиляционном трубопроводе покрытом алюминиевой фольгой при работающей СКВ

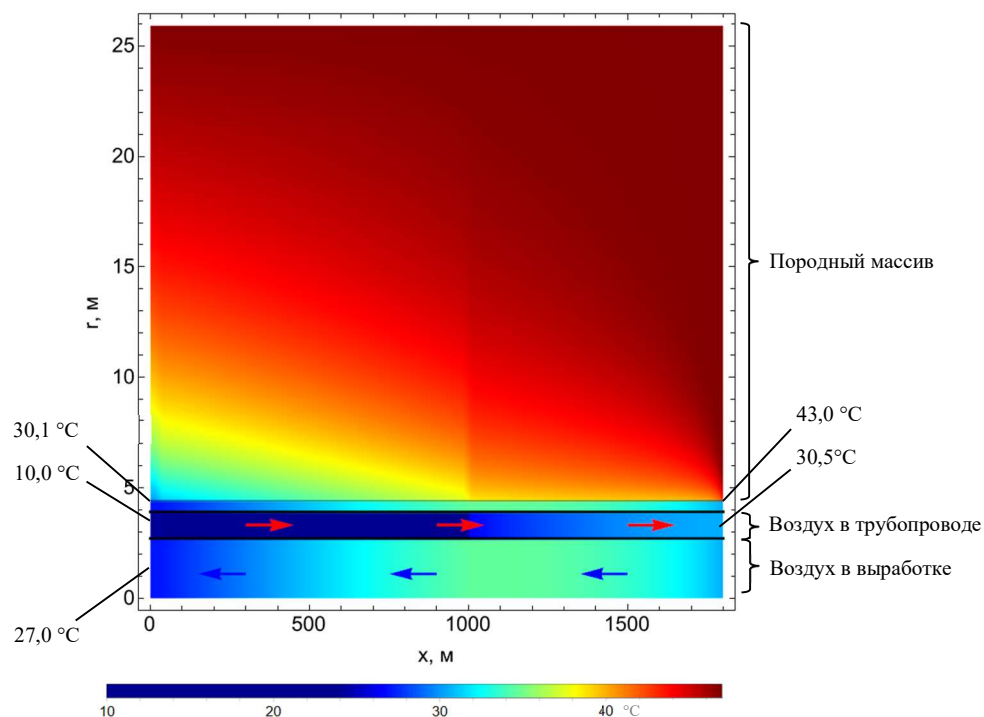


Рисунок 5.15 – Модельное теплораспределение в тупиковой выработке при работающей СКВ и трубопроводе, покрытом алюминиевой фольгой

Согласно полученным результатам, снижение степени черноты внешней поверхности трубопроводов позволило снизить температуру воздуха, подаваемого в забой, на 4,5 °С до 30,5 °С. Однако требуемая температура не достигнута, поэтому необходимо применение теплоизоляции трубопровода. Коэффициент теплопроводности теплоизоляции принимается равным 0,07 Вт/(м·°С) (минеральная вата). Для наибольшего эффекта следует оставить покрытие внешнего слоя алюминиевой фольгой. Результаты моделирования теплораспределения при применении теплоизолированных вентиляционных трубопроводов приведены на рисунках 5.16 и 5.17.

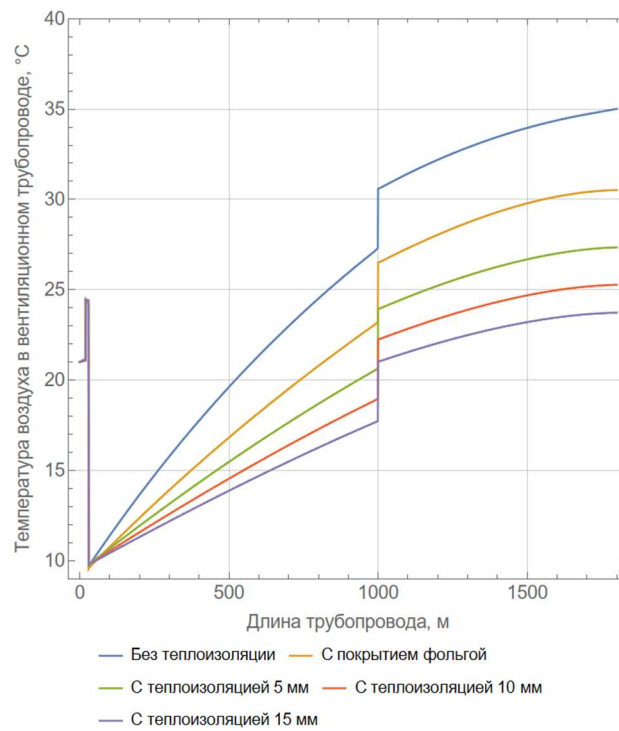


Рисунок 5.16 – График температуры воздуха в теплоизолированном вентиляционном трубопроводе, покрытом алюминиевой фольгой при работающей СКВ

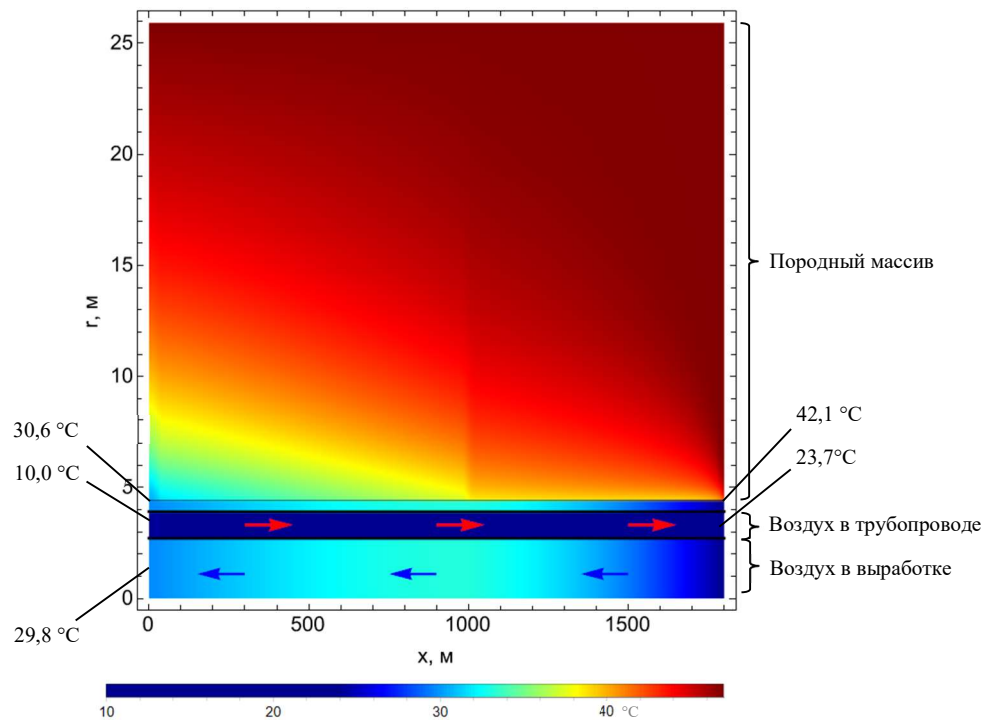


Рисунок 5.17 – Модельное теплораспределение в тупиковой выработке при работающей СКВ и теплоизолированным (15 мм) трубопроводом, покрытом алюминиевой фольгой

Таким образом, применение теплоизолированного трубопровода, покрытого алюминиевой фольгой с толщиной теплоизоляции 15 мм позволяет снизить температуру воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода до температуры 23,7 °C.

Температура воздуха после ВМП составляет 24,4 °С, далее он охлаждается до 10 °С, тогда тепловые процессы на i-d диаграмме для давления 124 кПа будут выглядеть следующим образом:

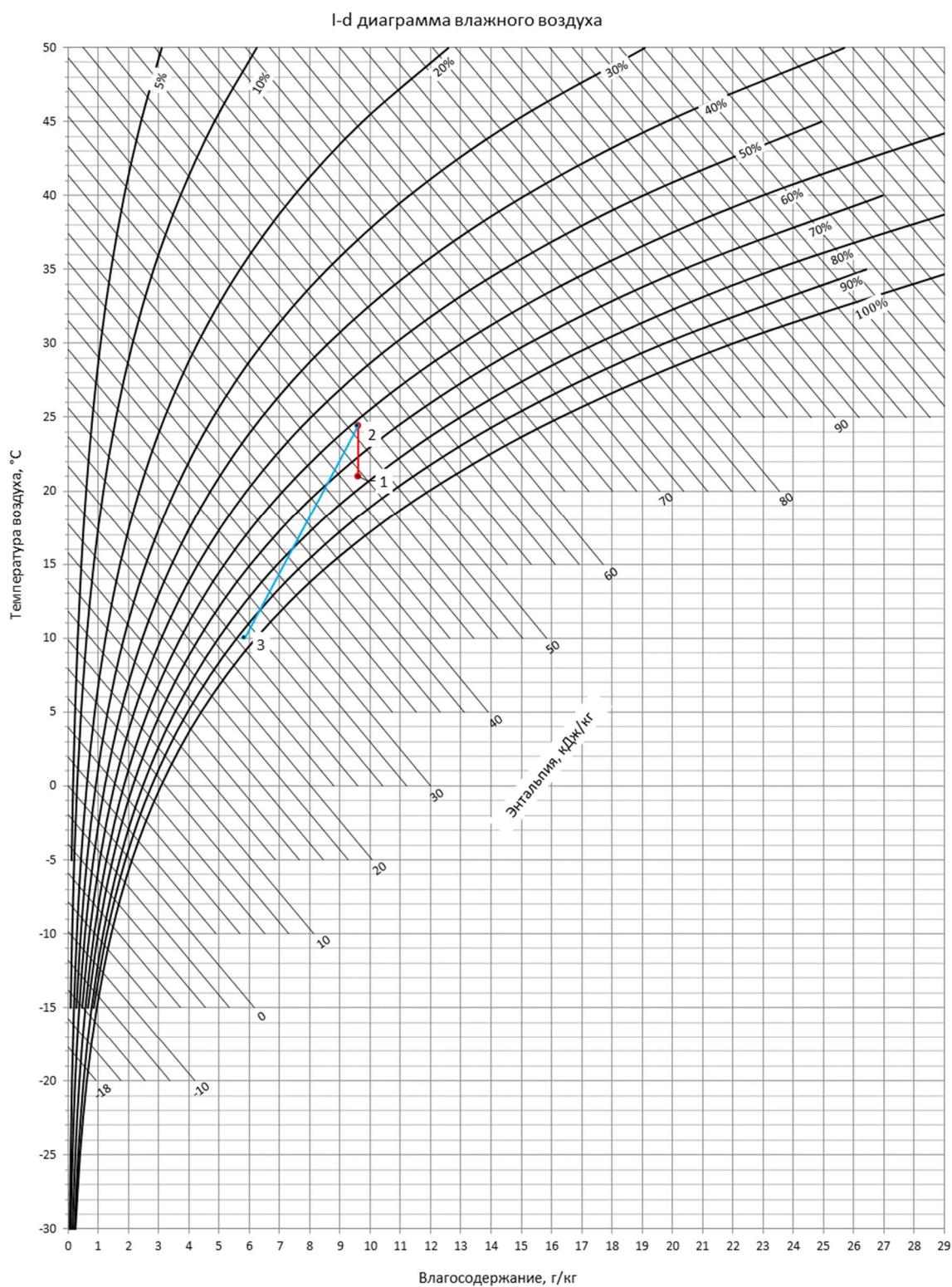


Рисунок 5.18 – Тепловые процессы в локальной СКВ на i-d диаграмме для давления 124 кПа

Процесс 1-2 показывает нагрев воздуха от работы ВМП, процесс 2-3 показывает охлаждение воздуха на воздухоохладителе. Результаты определения параметров воздуха сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты определения параметров воздуха при его охлаждении до 10 °С

Номер точки	Температура, °С	Влажосодержание, г/кг	Энтальпия, кДж/кг
1	21,0	9,6	45,5
2	24,4	9,6	49,0
3	10,0	5,9	24,8

Тогда требуемая мощность охлаждения составит:

$$Q_{\text{во}} = 15 \cdot 1,43 \cdot (49,0 - 24,8) = 519 \text{ кВт},$$

При текущем максимальном размере вентиляционного трубопровода – 1,4 м единственным способом минимизации тепловой мощности СКВ является увеличение теплоизоляции вентиляционного трубопровода. Максимально возможная толщина теплоизоляции составит 100 мм. Результаты определения необходимого уровня охлаждения при данной толщине представлены на рисунках 5.19 и 5.20.

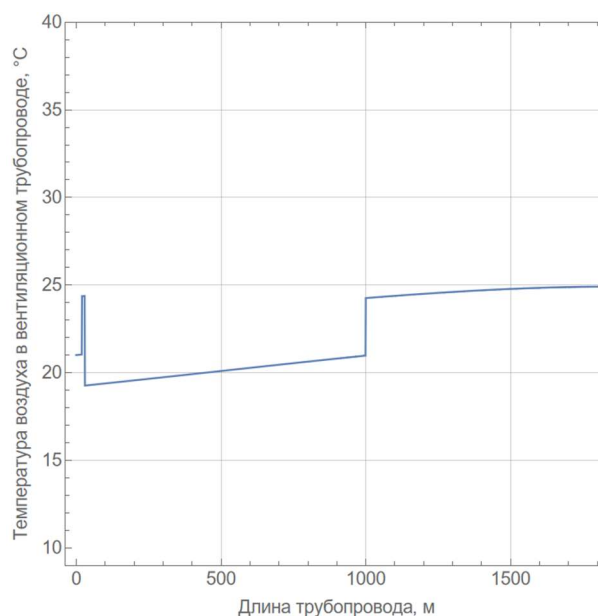


Рисунок 5.19 – График температуры воздуха в теплоизолированном вентиляционном трубопроводе (100 мм), покрытом алюминиевой фольгой, при работающей СКВ

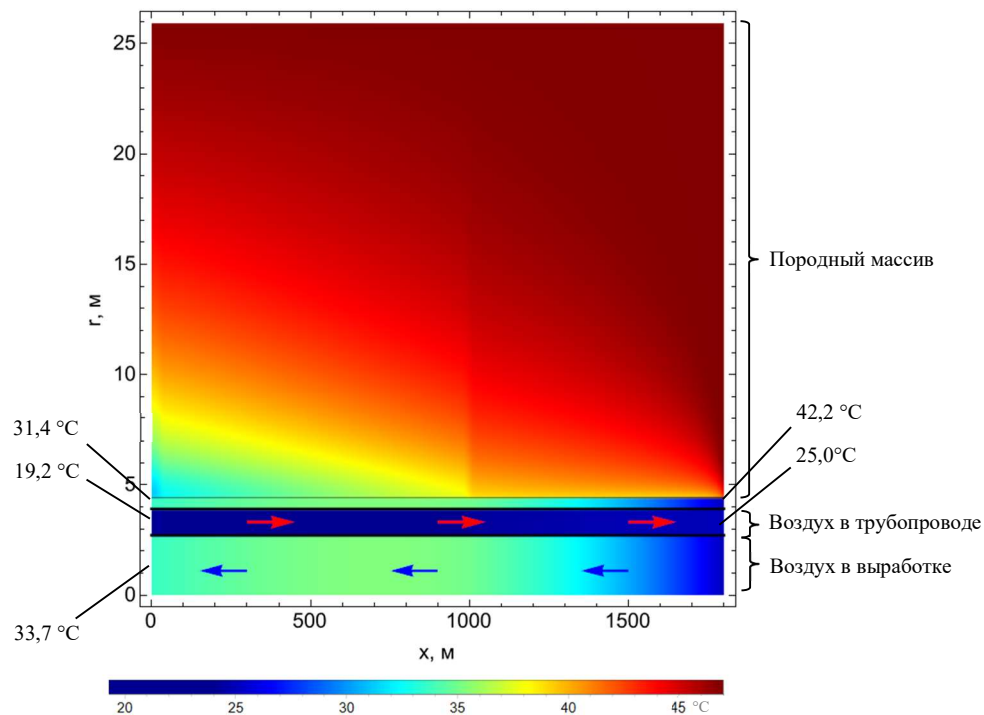


Рисунок 5.20 – Модельное теплораспределение в тупиковой выработке при работающей СКВ и теплоизолированном (100 мм) трубопроводе, покрытом алюминиевой фольгой

При данной конфигурации системы необходимо охлаждать воздуха с 24,4 °С, до 19,2 °С. Тогда тепловые процессы на i-d диаграмме будут выглядеть следующим образом:

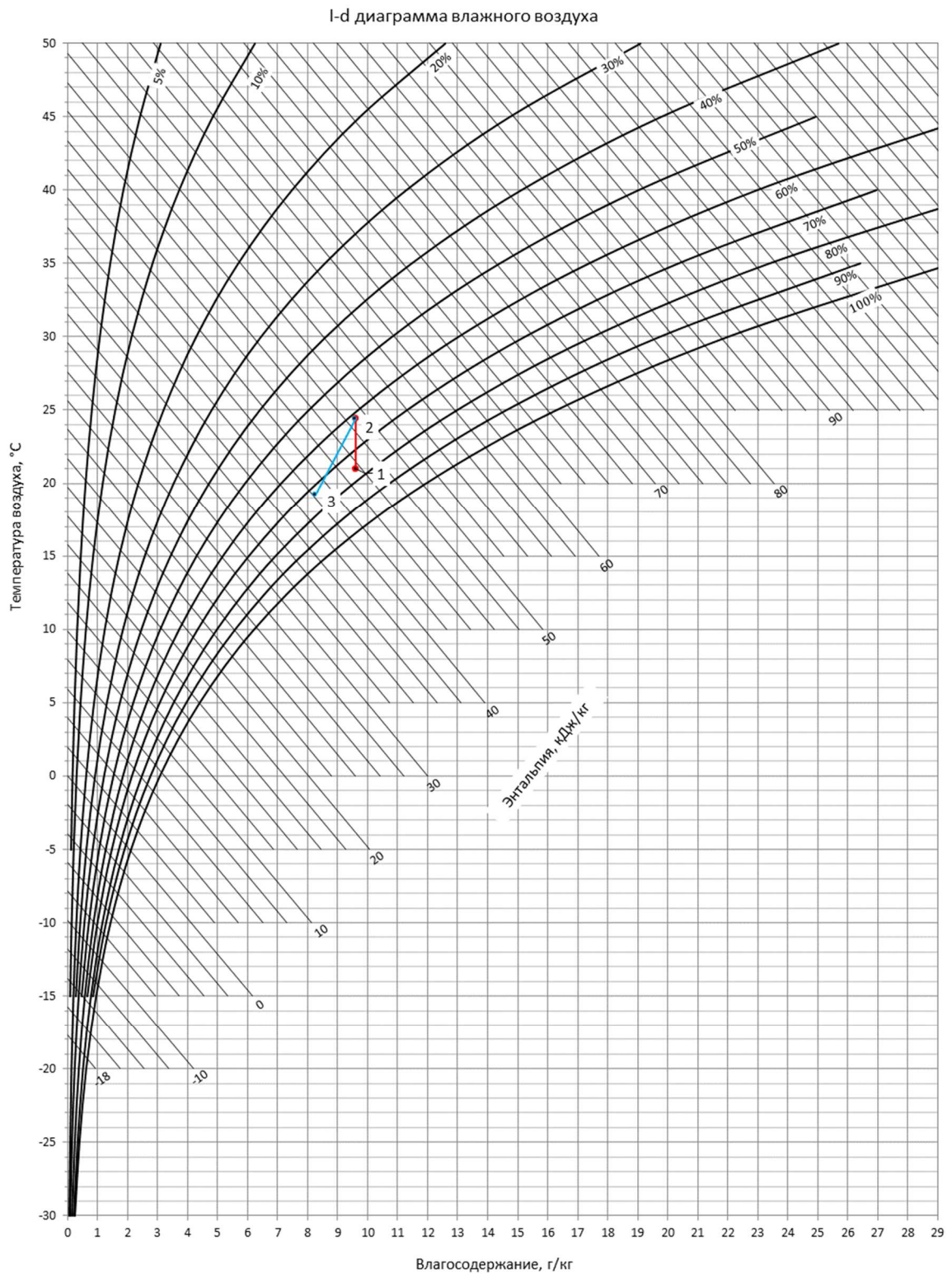


Рисунок 5.21 – Тепловые процессы в локальной СКВ на i-d диаграмме для давления 124 кПа

Результаты определения параметров воздуха сведены в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты определения параметров воздуха при его охлаждении до 19,2 °С

Номер точки	Температура, °С	Влагосодержание, г/кг	Энтальпия, кДж/кг
1	21,0	9,6	45,5
2	24,4	9,6	49,0
3	19,2	8,3	40,2

Тогда требуемая мощность охлаждения составит:

$$Q_{\text{в0}} = 15 \cdot 1,43 \cdot (49,0 - 40,2) = 189 \text{ кВт},$$

Таким образом, применение теплоизоляции толщиной 100 мм позволяет снизить требуемую мощность охлаждения с 519 кВт до 189 кВт, что позволяет существенно снизить капитальные затраты на холодильную машину и воздухоохладитель, а также эксплуатационные затраты.

Так как при толщине теплоизоляции 100 мм 150 кВт холодопроизводительности из 189 тратятся на компенсацию нагрева воздуха от работы двух ВМП, а остальная часть на компенсацию нагрева воздуха в вентиляционном трубопроводе и конденсацию влаги, то эффект от дополнительного растепления массива от работы СКВ будет минимальным и производить его оценку нет необходимости при данной толщине теплоизоляции.

Разработанные технические решения были успешно применены при строительстве выработки РВ-2 (см. рисунки 5.22 - 5.23).



Рисунок 5.22 – Система кондиционирования воздуха применяемая в выработке РВ-2

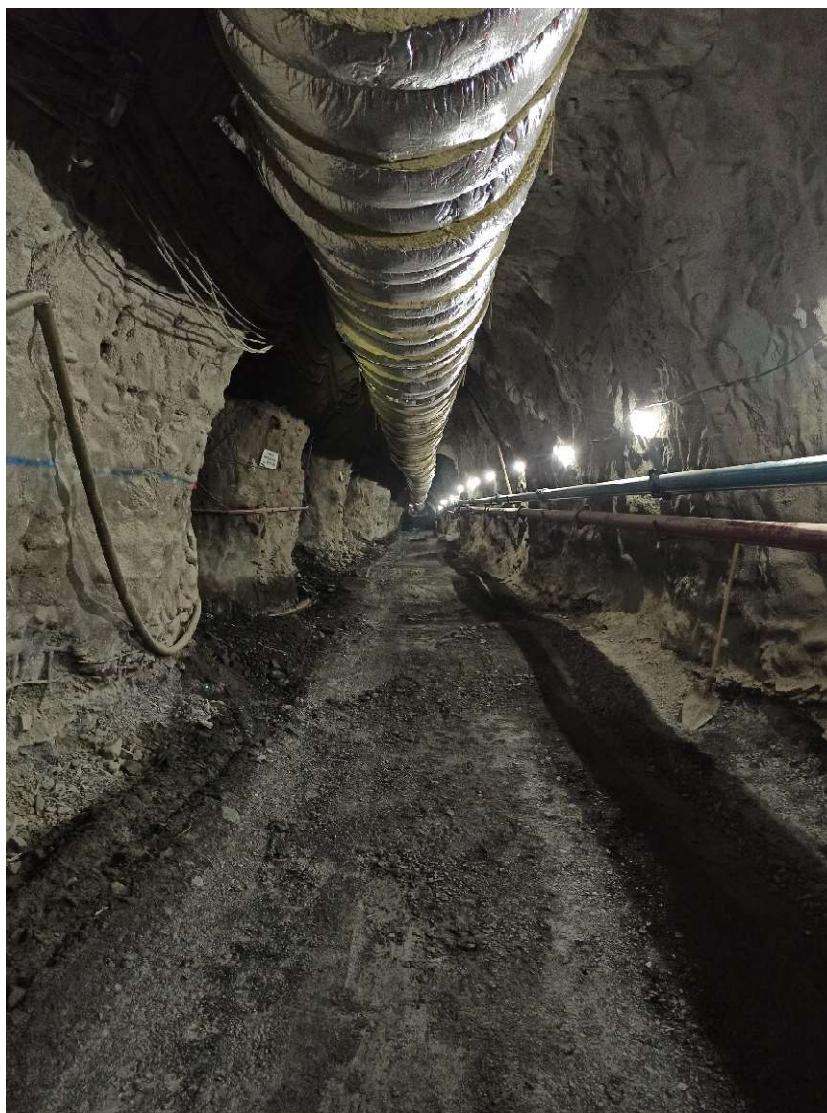


Рисунок 5.23 – Теплоизолированный трубопровод применяемый в выработке РВ-2

5.4 Выводы

В результате проведенных исследований, направленных на улучшение расчёта способов управления тепловым режимом в рабочей зоне тупиковой горной выработки, можно сделать следующие выводы:

- разработанная программа расчёта теплораспределения в тупиковой горной выработке учитывающая движение забоя выработки, тепловыделения от техногенных источников и лучистый теплообмен, позволяет управлять тепловым режимом в рабочей зоне тупиковой горной выработки и оценивать эффективность различных способов управления;
- разработана методика подбора различных способов управления тепловым режимом в рабочей зоне тупиковой горной выработки;
- произведен прогноз теплового режима в тупиковой горной выработке РВ-2 шахты «Глубокая» рудника «Скалистый» ПАО «ГМК «Норильский никель» и

предложены соответствующие способы управления позволившие достичь требуемой температуры воздуха в рабочей зоне на всем периоде строительства тупиковой выработки.

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:

- 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;
- разработана математическая модель теплообмена 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;
- определена эффективность различных способов управления тепловым режимом в тупиковых выработках и их комбинаций;
- 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;
- предложен новый способ расчета местных СКВ с учетом применения теплоизолированных вентиляционных труб, который позволяет обеспечить требуемой температурой воздуха рабочие зоны протяженных тупиковых выработок;
- предложен новый способ расчета местных СКВ, учитывающий растепление породного массива от работы СКВ, позволяющий существенно снизить значение требуемой холодопроизводительности;
- разработана методика управления тепловым режимом тупиковых горных выработок, на основе разработанной математической модели позволяющая достигать требуемых микроклиматических параметров рудничной атмосферы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Агеева К. М. Исследование зависимости микроклиматических параметров от скорости движения воздуха и коэффициента рециркуляции в длинных очистных забоях в условиях рудника 4 РУ ОАО "Беларуськалий" // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. — 2016. — №. 1. — С. 214-217.
- 2 Алабьев В. Р. Основные направления развития способов и средств охлаждения воздуха в угольных шахтах Украины // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2014. — №. 6. — С. 35-46.
- 3 Алабьев В. Р., Новиков В. В., Пашинян Л. А., Бажина Т. П. Нормализация теплового режима протяженных тупиковых выработок при высоких температурах пород на основе шахтных передвижных кондиционеров // Записки Горного института. — 2019. — Т. 237. — С. 251-258.
- 4 Аренс В. Ж., Дмитриев А. П., Дядькин Ю. Д. Теплофизические аспекты освоения ресурсов недр. — Л.: Недра, 1988. — 336 с.
- 5 Баратов Э. И., Черняк В. П. Тепловые расчеты и способы охлаждения воздуха при строительстве глубоких шахт. — М.: Недра, 1968. — 123 с.
- 6 Богинский П. Я., Гендлер С. Г., Хуцшвили В. И. Исследование процессов нестационарного теплообмена при нагнетательном проветривании тупиковых выработок. — В кн.: Физические процессы горного производства. / Сб-к научных трудов. — Л.: Изд-во ЛГИ, 1977. — № 4 — С. 80-86.
- 7 Брайчева Н. А. Методы расчета температуры вентиляционного воздуха подземных сооружений. — Киев: Наукова думка, 1981. — 183 с.
- 8 Величко А.Е. Тепловой расчет тупиковых выработок — В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых. / Респ. межвед. научно-техн. сб-к. — Киев: Техника, 1978. — Вып. 49. — С. 40-44.
- 9 Волощук С. Н., Андреев Г. Г. Теплоизоляция стенок горных выработок. — Шахтное строительство, 1972. — № 2.— С. 51-56.
- 10 Воропаев А. Ф, Управление тепловым режимом в глубоких шахтах. — М.: Госгортехиздат, 1961. — 248 с.
- 11 Воропаев А. Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. — М.: Недра 1966. — 252 с.
- 12 Воропаев А. Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. — М.: Недра, 1977. — 359 с.

- 13 Воропаев А. Ф. Тепловая дисперсия шахтной вентиляции. — М.: Изд-во АН СССР, 1950. — 110 с.
- 14 Воропаев А. Ф. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха в глубоких шахтах. — М., Недра, 1979. — 192 с.
- 15 Галкин А. Ф. Тепловой режим подземных сооружений Севера. — Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. — 304 с
- 16 Дуганов Г. В., Баратов Э. И. Тепловой режим рудников. — М.: Госгортехиздат, 1963. — 144 с.
- 17 Дядькин Ю. Д. Борьба с высокими температурами в глубоких шахтах и рудниках. — М.: Углетехиздат, 1957. — 240 с.
- 18 Дядькин Ю. Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. — М.: Недра, 1968. — 265 с.
- 19 Дядькин Ю. Д., Шувалов Ю. В., Тимофеевский Л. С. Горная теплофизика. Регулирование теплового режима шахт и рудников. Учебное пособие. — Л.: ЛГИ, 1976. - 159 с.
- 20 Кузин, В. А., Величко, А. Е., Хохотва, Н. Н. Единая методика прогнозирования температурных условий в угольных шахтах // Макеевка-Донбасс: Издательство МакНИИ, 1979. — 189 с.
- 21 Зайцев, А. В., Бородавкин, Д. А., Поляков, И. В., Власова, Е. М. Нормирование температурного режима в условиях нагревающего микроклимата горных выработок // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2021. — №. 4. — С. 145-158.
- 22 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.
- 23 Зайцев А. В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников. дисс. д-ра техн. наук. — Пермь, 2019. — 247 с.
- 24 Зайцев А. В. Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: дисс. канд. техн. наук. — Пермь, 2013. — 168 с.
- 25 Зайцев А. В., Поляков И. В. Обеспечение безопасных условий труда в подземных горных выработках по фактору микроклимата: новые результаты и направления исследований // Горное эхо. — 2021. — №. 3. — С. 89-96.

- 26 Зимин Л. Б. Использование естественных и техногенных энергоресурсов в системах нормализации микроклимата подземных сооружений. Автореферат дисс. ... д-ра техн. наук. — К., 1995. — 40 с.
- 27 Зимин Л. Б. Исследование и прогноз теплового режима тупиковых горных выработок глубоких шахт. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. — Новочеркасск, 1979. — 20 с.
- 28 Кертиков В. Изчисляване температурата на въздуха в глухи изработки, качато е зададена температурата ту при постъпване в забойнато пространство. Годишн. Висш. Минно-геол. Ин-т. Техника, София, 1971-1972. т. 23, № 3. — С. 119-124.
- 29 Кертиков В. Методика за изчисляване температурата на въздуха в проветрявани глухи минни изработки. Годишн. Висш. Минно-геол. Ин-т, — Техника, София, 1971-1972. Т. 18, № 3, — С. 101-117.
- 30 Кертиков В. Методика за изчисляване температурата на въздуха при комбинираната схема на местне проветряване, кочато нагнетателният вентилатор с монтиран в началто на изработката. Рудодобив, 1973 т.28, № 9. — С.7-10
- 31 Клебанов Ф. С., Костин В. А. Расчет теплового режима в подготовительной выработке, проводимой механизированным коммлексом // Научн.сообщ. ИГД ИМ.А.А.СКОЧИНСКОГО, 1975, т.26. — С. 199-204.
- 32 Кормщиков Д. С., Попов М. Д. Нормализация теплового режима глубоких залежей рудника «Таймырский» до момента ввода системы кондиционирования // Горное эхо. — 2019. — №. 2. — С. 92-96.
- 33 Кочнев К. В. Тепловое кондиционирования рудничного воздуха. — Изд-во АН СССР, 1960.
- 34 Кремнев О. А, Основы теории теплопроводности горных массивов и моделирование теплообмена в шахтах. Труды семинара по горной теплотехнике. — К., 1959 вып. 2.
- 35 Кремнев О. А. Нестационарная теплопроводность породных массивов шахтных выработок при переменной по времени температуре вентиляционной струи. — Труды ИТЭ АН УССР, 1952, № 4.
- 36 Кремнев О. А. Теоритические и экспериментальные основы теплового расчета глубоких шахт и установок для охлаждения рудничного воздуха. Автореферат дисс. ... д-ра техн. наук. — ЛГИ, 1960. — 50 с.
- 37 Криворучко А. М., Ильюшенко Р. Г., Микульский Б. В. Теплонасыщение воздуха за счет окислительных процессов в угольных шахтах Донбасса / Тезисы

- выступлений Всесоюзной научно-технической конференции. Проблемы горной теплофизики. — Л., ЛГИ, 1973. — С.41-43
- 38 Левин Л. Ю. Разработка шахтной подземной установки кондиционирования воздуха для условий глубокого рудника " Таймырский" // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2013. — С. 253-255.
- 39 Луговский С. И. Проветривание глубоких рудников. — Госгортехиздат, 1962. — 324 с.
- 40 Малахов Г. М., Черноус А. П. Вскрытие и разработка рудных месторождений на больших глубинах. — Госгортехиздат, 1962. — 300 с.
- 41 Малашенко Э. Н., Зимин Л. Б. Методы тепловых расчетов тупиковых горных выработок // Тепловой режим глубоких угольных шахт и металлически рудников. — Киев: Наукова Думка, 1977. — С. 101—116
- 42 Мартынов А. А., Малеев Н. В., Яковенко А. К. Тепловые расчеты и выбор средств охлаждения для регулирования микроклимата в тупиковых выработках глубоких шахт // Розробка родовищ. — 2013.
- 43 Методическое руководство по выбору наиболее эффективных мероприятий, направленных на улучшение тепловых условий в действующих шахтах Донецкого бассейна. — Донецк, 1973. — 187 с
- 44 Михеев М. А. Основы теплопередачи. — М.-Л.: ГЭИ, 1956. — 390 с.
- 45 Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Издание второе, стереотипное. — М.: «Энергия», 1977. — 344 с.
- 46 Монаков В. Я. Результаты исследований по обеспечению пожаробезопасности очистных работ на больших глубинах. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания. Основные направления развития техники и технологии добычи руд цветных металлов на глубоких горизонтах. — М., Цветметинформация, 1974. — С. 39-41
- 47 Морев А. М., Мартынов А. А., Малеев Н. В., Яковенко А. К. Программное обеспечение расчета температуры воздуха в выработках выемочных участков глубоких шахт // Безопасность труда в промышленности. — 2012. — №. 1. — С. 52-57.
- 48 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.

- 49 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.
- 50 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
- 51 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>
- 52 Ониани Ш. И. К вопросу определения тепловыделений от окислительных процессов в выработках глубоких шахт // Мецниереба, АН ГрССР. —1966. — Т.43, №3. — С. 109-117.
- 53 Ониани Ш. И. Тепловой режим рудничной атмосферы при наличии в горном массиве термальных вод. – В кн.: Тепловой режим глубоких угольных шахт и металлических рудников. — К., 1977. — С.49-60.
- 54 Петренко Е. В., Дуганов Г. В., Кухарев В. Н. Разработка крутых пластов на больших глубинах. — М., Недра, 1968. — 160 с.
- 55 Прогнозування та нормалізація теплових умов у вугільних шахтах. СОУ-Н 10.1.00174088.027:2011. — Макіївка, 2011. — 188 с.
- 56 Росс И. Установление теплотехнических характеристик выемочных штреков и лав. // Глюкауф. — 1970. — №23,. — С.73-76.
- 57 Скуба В. Н. Совершенствование разработки угольных месторождений области многолетней мерзлоты. — Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1974. — 320 с.
- 58 Смирнов Ю. М. Управление тепловым режимом тупиковых выработок глубоких рудников Норильска: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, 1998. — 21 с.
- 59 Соловьев Д. Е. Методы расчета температурного и вентиляционного режимов нестационарной сети горных выработок криолитозоны: дисс. канд. техн. наук. — Якутск, 2009. — 161 с.
- 60 Стукало В. А. О коэффициенте нестационарного теплообмена выработок, проветриваемых менее года // Разработка месторождений полезных ископаемых. Республ. межвед. науч.-техн. сб. — М., 1976. — выш.43. — с.62-64.

- 61 Сухан П. Кондиционирование воздуха в глубоких шахтах. — М., Недра, 1969. — 208 с.
- 62 Технологические схемы комплекса установок кондиционирования воздуха глубоких шахт. — Донецк: Донгипрошахт, 1987. — 96 с.
- 63 Ушаков К. З., Бурчаков А. С., Пучков Л. А., Медведев И. И. Аэрология горных предприятий. — М.: Недра, 1987. — 421 с.
- 64 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». — 2020. — 523 с.
- 65 Хохолов Ю. А., Соловьев Д. Е. Математическое моделирование тепловых процессов в горных выработках шахт и рудников севера. — Новосибирск: Гео, 2013. — 186 с.
- 66 Цейтлин Ю. А. Установки для кондиционирования воздуха в шахтах. — М., Недра, 1974. — 168 с.
- 67 Цейтлин Ю. А., Абрамова Т. С., Могилевский В. И. Проектирование и эксплуатация шахтных систем кондиционирования воздуха. — М., Недра, 1983. — 261 с.
- 68 Черняк, В.П. Тепловые расчеты подземных сооружений // Киев: Наукова думка, 1993. — 200 с.
- 69 Шточес Б., Черник Б. Вентиляция глубоких шахт. — Киев: Гос. науч.-техн. изд-во Украины, 1934. — 217 с.
- 70 Шувалов Ю. В. Борьба с высокими температурами на каменноугольных шахтах ФРГ. — М., ЦНИИЭИуголь, 1973. — 60 с.
- 71 Шувалов Ю. В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера. — Л., ЛГУ, 1988. — 196 с.
- 72 Щербань А. Н., Кремнев О. А. Научные основы расчёта и регулирования теплового режима глубоких шахт: в 2-х томах. — Киев: Изд-во АН УССР, 1959. — т. 1 — 430 с.
- 73 Щербань А. Н., Кремнев О. А. Научные основы расчёта и регулирования теплового режима глубоких шахт: в 2-х томах. — Киев: Изд-во АН УССР, 1960. — т. 2 — 347 с.
- 74 Щербань А. Н., Кремнев О. А. Основы теории и методы тепловых расчетов рудничного воздуха. — М.: Углетехиздат, 1953. — С. 221.

- 75 Щербань А. Н., Кремнев О. А., Журавленко В. Я. Справочное руководство по тепловым расчетам шахт и проектированию установок для рудничного воздуха. — М.: Недра, 1964. — 507 с.
- 76 Щербань А. Н., Кремнев О. А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт: Изд-во 3-е, переработанное и дополненное — М.: Недра, 1977. — 359 с.
- 77 Щербань А. Н., Кремнев О. А., Козлов Е. М., Шелиманов Б. А. Аналитические зависимости, описывающие процессы изменения температуры и относительной влажности воздуха в шахтных выработках. // В кн. Труды семинара по горной теплофизике. — К., Наукова Думка, 1961. — С. 96 - 104
- 78 Щербань А. Н., Черняк В.П., Брайчева Н. А. Методы расчета температуры воздуха в строящихся горных выработках и воздухопроводах для их проветривания // ФТПРПИ. — 1977. — №5. — С. 69-76.
- 79 Щербань А. Н., Ягельский А. Н. Кондиционирования рудничного воздуха. — М.: Углетехиздат, 1956. — 352 с.
- 80 Щербань А. Н., Кремнев О. А. Исследование коэффициентов теплоотдачи в моделях горных выработок. — Киев: Изд-во АН УССР, 1951. — 77 с.
- 81 Шукин О. Г. К расчету подземных сооружений с различными источниками тепла и охлаждения. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. — М., Госстройиздат, 1965. — 172 с
- 82 Ягельский А. Н. Метод теплового расчета вентиляционной струи в тупиковой выработке. Труды семинара по горной теплотехнике, вып. 2. — Киев: Изд-во АН УССР, 1959.
- 83 Ягельский А.Н. Тепловые расчеты вентиляционного воздуха выработок с тупиковым забоем в глубоких угольных шахтах — М.: Недра, 1960. — 143 с.
- 84 Atkinson K., Han W., Stewart D. E. Numerical solution of ordinary differential equations. – John Wiley & Sons, 2009. – Т. 81.
- 85 Belle B., Biffi M. Cooling pathways for deep Australian longwall coal mines of the future // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – Т. 28, № 6. – С. 865-875.
- 86 Brake D. Design of the world’s largest bulk air cooler for the Enterprise Mine in Northern Australia // Mine Ventilation: Proceedings of the North American/Ninth US Mine Ventilation Symposium. – 2002. – С. 381-390.
- 87 Cluff D. L., Kennedy G. A., Foster P. J. Liquid air for energy storage, auto-compression, compressed air and ventilation in deep mining // Deep Mining 2014: Proceedings of the

- Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining. – Australian Centre for Geomechanics, 2014. – C. 757-770.
- 88 Cuifeng, D., & Menglong, B. Numerical simulation of fluid solid coupling heat transfer in tunnel // *Case Studies in Thermal Engineering*, 2018. – № 12. – C. 117-125. doi:10.1016/j.csite.2018.03.007
- 89 De Broaf W.L. Echauf&nt de l'air de ventilation dans les puis et les voies d'entree d'air // *Géologie en Minbouw*, 1961. – № 4. – C.25-28.
- 90 Fritzsche H. Heutiger Stand und Zukunftsmöglichkeiten der Wetterkühlung in heissen Gruben // *Gluckauf* – 1940. – №76.
- 91 Hardcastle S. Controlling personnel heat exposure in Canada's deep and highly mechanized mines // *Proceedings of the 11th US/North American Mine Ventilation Symposium-11th US/North American Mine Ventilation Symposium 2006*. – C. 259-269.
- 92 Jansen F. Die Erwärmung der Wetter in tiefen Steinkohlengruben und die Möglichkeiten einer Erhonung der Kaltenwirkung des Wetterstromes. // *Gluckauf*. – 1927. – № 63.
- 93 Jeppe C.W. The estimation of ventilation air temperature in deep mines // *Journal Chem. Met. Min. Soc. of South Africa*. – 1939. – T. 40, №1.
- 94 Jordan D.W. The Numerical Solution of Underground Heat Transfer Problems-III. The Calculation of Temperature Distribution in Dry and Wet Force-Ventilated Headings. // *Jnt, J. Rock. Mech. Min. Sei.* – Pergamon Press Ltd., London 1965. – T. 2. – C. 365-387.
- 95 Knechtel J., Maciejewska-Soltys W. Moziliwacs stosowania w polskich Kopalniach werlaradwanickiej metody prognozowania temperatury powietrza w wyribis-kach slepych // *Prz gorniezy*. – 1975. – T. 31, № 6. – C. 243-252.
- 96 Krasnoshtein A. E., Kazakov B. P., Shalimov A. V. Modeling phenomena of non-stationary heat exchange between mine air and a rock mass // *Journal of Mining Science*. – 2007. – T. 43. – C. 522-529.
- 97 Kuyuk, A. F., Ghoreishi-Madiseh, S. A., Sasmito, A. P., & Hassani, F. Designing a large-scale lake cooling system for an ultra-deep mine: A Canadian case study // *Energies*. – 2019. – T. 12, № 5. – статья № 811.
- 98 Kuyuk A. F., Ghoreishi-Madiseh S. A., Hassani F. P. Closed-loop bulk air conditioning: A renewable energy-based system for deep mines in arctic regions // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2020. – T. 30, № 4. – C. 511-516.

- 99 Lane M. D., Christensen P. R. Thermal infrared emission spectroscopy of salt minerals predicted for Mars // *Icarus*. – 1998. – Т. 135, № 2. – С. 528-536. DOI:10.1006/icar.1998.5998
- 100 Li, Z.; Liu, H.; Xu, Y.; Li, R.; Jia, M.; Zhang, M. Numerical analysis on the thermal performance in an excavating roadway with auxiliary ventilation system // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2021. – Т. 18, № 3. – статья № 1184. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031184>
- 101 Mackay L., Bluhm S., and Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining // *The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition «Boom or Bust»*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2010. – С. 285-292.
- 102 McPherson M. J. Refrigeration plant and mine air conditioning systems // *Subsurface ventilation and environmental engineering*. Springer. – 1993. – С. 651-738.
- 103 Moukalled F, Mangani L, Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*. – Springer International Publishing, 2016. – С. 103-135. DOI: 10.1007/978-3-319-16874-6.
- 104 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.
- 105 Pretorius J. G., Mathews M. J., Mare P., Kleingeld M., Rensburg J. Implementing a DIKW model on a deep mine cooling system // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 319-326.
- 106 Roghanchi P., Kocsis K. C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by re-designing the auxiliary ventilation system: a case study // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 280-293. doi:10.1504/ijmme.2017.087965
- 107 Sasmito A. P., Kurnia J. C., Birgersson E., Mujumdar A, S. Computational evaluation of thermal management strategies in an underground mine // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Т. 90. – С. 1144-1150. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.01.062
- 108 Stephenson D. Distribution of water in deep gold mines in South Africa // *International journal of mine water*. – 1983. – Т. 2, № 2. – С. 21-30.

- 109 Sureshkumar R., Kale S. R., Dhar P. L. Heat and mass transfer processes between a water spray and ambient air–I. Experimental data // *Applied Thermal Engineering*. – 2008. – Т. 28, № 5-6. – С. 349-360.
- 110 Swart C. Optimising the operation of underground mine refrigeration plants and ventilation fans for minimum electricity cost: дис. – North-West University, 2003.
- 111 Van Baalen G., Howes M. J. Evaluation of future refrigeration for the Enterprise Mine // Mount Isa, 9th IMVC, Delhi. – 2009.
- 112 Vosloo J., Liebenberg L., Velleman D. Case study: Energy savings for a deep-mine water reticulation system // *Applied Energy*. – 2012. – Т. 92. – С. 328-335.
- 113 Voss J. Schitters. Qimavorausberuchung fur Sonderbeuetterte. Grubenbauen und Tunnel // *Glukauf-Forsch.* –1971. – №3. – С. 109-121.
- 114 Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Yang, S. Thermodynamic characteristics of deep space: Hot hazard control case study in 1010-m-deep mine // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2021. – Т. 28. – статья № 101656.
- 115 Wróblewski A., Banasiewicz A., Gola S. Heat balance determination methods for mining areas in underground mines – A review // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2021. – Т. 942, № 1. – статья № 012011.
- 116 Xin, S., Wang, W., Zhang, C., Li, C., Li, H., & Yang, W. Effects of rock-airflow conjugated heat transfer in development headings: A numerical study // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2022. – Т. 172. – статья № 107301.
- 117 Zhang, C., Yuan, S., Zhang, N., Li, C., Li, H., & Yang, W. Dust-suppression and cooling effects of spray system installed between hydraulic supports in fully mechanized coal-mining face // *Building and Environment*. – 2021. – Т. 204. – статья № 108106.
- 118 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.
- 119 Zheng Q., Ke Y., Wang H. Design and evaluation of cooling workwear for miners in hot underground mines using PCMs with different temperatures // *International journal of occupational safety and ergonomics*. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 118-128.