

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический
университет»

На правах рукописи

Зайцев Артём Вячеславович



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

Специальность 25.00.20

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
профессор, доктор технических наук
Казаков Борис Петрович

Пермь 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. МИКРОКЛИМАТ ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ И СПОСОБЫ ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	14
1.1. Тепловой режим горных выработок глубоких рудников	14
1.2. Нормирование микроклиматических условий в горных выработках	19
1.2.1. Требования к микроклиматическим условиям на отечественных горнодобывающих предприятиях.....	19
1.2.2. Зарубежный опыт нормирования микроклиматических условий.....	22
1.3. Методы прогнозирования микроклиматических параметров рудничного воздуха	29
1.3.1. Аналитические методы.....	30
1.3.2. Численные методы.....	36
1.4. Способы регулирования микроклиматических условий	41
1.4.1. Горнотехнические способы регулирования теплового режима	42
1.4.2. Теплотехнические способы регулирования теплового режима	43
1.4.3. Ресурсосберегающие технологии регулирования теплового режима	47
1.5. Цель и задачи исследования	53
2. ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ	55
2.1. Экспериментальные исследования теплового режима глубоких рудников	55
2.1.1. Медно-никелевые рудники Норильского промышленного района	56
2.1.2. Калийные рудники Старобинского месторождения калийных солей.....	60
2.1.3. Закономерности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников	63
2.2. Исследование и моделирование техногенных источников тепловыделения	65
2.2.1. Машины с двигателями внутреннего сгорания	65
2.2.2. Машины с электрическими приводами	69
2.2.3. Твердеющие закладочные массивы.....	74
2.3. Разработка математической модели сопряженного тепло- и массопереноса в сети горных выработок и массиве горных пород	76
2.3.1. Моделирование распределения воздуха, теплоты и влаги в сети горных выработок.....	76
2.3.2. Учёт сопряженного теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом.....	83
2.3.3. Учёт влагообмена в атмосфере горных выработок	89
2.3.4. Верификация разработанной математической модели	92

2.4. Классификация горных выработок глубоких рудников по факторам формирования теплового режима	94
2.5. Выводы	95
3. ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА В ГЛАВНЫХ ВОЗДУХОПОДАЮЩИХ ВЫРАБОТКАХ.....	97
3.1. Исследование эффективности поверхностных систем кондиционирования воздуха	97
3.2. Способы уменьшения нагрева воздуха в главных воздухоподающих выработках.....	103
3.2.1. Оптимизация размеров выработок	103
3.2.2. Оптимизация параметров теплоизоляции стенок выработок	107
3.3. Перспективы использования систем автоматического управления проветриванием для регулирования теплового режима	111
3.4. Выводы	114
4. НОРМАЛИЗАЦИЯ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПОДЗЕМНЫХ РАБОЧИХ ЗОНАХ НА ОСНОВЕ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ	116
4.1. Исследование эффективности рециркуляционного проветривания для снижения температуры воздуха в рабочих зонах	117
4.2. Испытания системы рециркуляционного проветривания для нормализации микроклиматических условий на руднике 4 РУ ОАО «Беларуськалий».....	121
4.3. Расчет параметров рециркуляционного проветривания по тепловому фактору	127
4.4. Выводы	131
5. РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА	133
5.1. Математическое моделирование теплообменных процессов в рекуперативных теплообменных аппаратах	133
5.1.1. Перекрестное движение хладоносителя и воздуха.....	134
5.1.2. Однонаправленное движение хладоносителя и воздуха.....	138
5.1.3. Противоположно направленное движение хладоносителя и воздушной среды	141
5.1.4. Учет конденсации влаги при охлаждении воздуха.....	142
5.2. Экспериментальные исследования характеристик теплообменных аппаратов	147
5.3. Разработка высокоэффективного теплообменного аппарата для подземных передвижных систем кондиционирования воздуха	153
5.3.1. Оптимизация компоновки теплообменных модулей	154
5.3.2. Разработка конструктивных решений.....	155
5.4. Выводы	159

6. РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ И ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТКАХ	161
6.1. Оптимизация мест установки и параметров воздухоохладителей в сети подготовительных и очистных выработок	161
6.2. Разработка ресурсосберегающих технологических схем локального кондиционирования воздуха.....	164
6.2.1. Системы разработки с длинными очистными забоями.....	164
6.2.2. Проходческие забои и системы разработки с короткими очистными забоями.....	169
6.3. Испытания подземной системы кондиционирования воздуха КШР-350Н на руднике «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».....	174
6.4. Выводы	183
7. НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ	184
7.1. Разработка и обоснование системы нормирования микроклиматических условий	185
7.1.1. Исследование критериев оценки микроклиматических условий.....	186
7.1.2. Обоснование системы нормирования микроклиматических условий и организации труда по тепловому фактору	191
7.2. Методические основы построения комплексных ресурсосберегающих систем нормализации микроклиматических условий.....	194
7.2.1. Разработка тепловой модели рудника.....	195
7.2.2. Расчет микроклиматических параметров в рабочих зонах	197
7.2.3. Определение оптимального сочетания способов регулирования теплового режима.....	199
7.2.4. Выбор способа отведения избыточных тепловыделений	203
7.3. Разработка программного модуля «Теплофизика»	207
7.4. Разработка ресурсосберегающей системы нормализации микроклиматических условий в шахте «Глубокая» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».....	210
7.5. Выводы	225
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	227
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	229

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации

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

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

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

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

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

Цель работы

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

Основная идея работы

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

Основные задачи работы:

1. Выполнить экспериментальные исследования формирования микроклиматических параметров воздуха в подземных рабочих зонах глубоких рудников различных типов.
2. Исследовать тип, мощность и характер тепловыделения техногенных источников в горных выработках глубоких рудников.

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

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

Основные научные положения, выносимые на защиту:

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

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

Научная новизна:

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

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

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

Практическое значение и реализация результатов работы

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

В настоящее время многие результаты работы внедрены в промышленную эксплуатацию на горнодобывающих предприятиях, часть находится в процессе внедрения. Разработанная подземная система кондиционирования воздуха КШР-350Н, предназначенная для местного кондиционирования воздуха, в настоящее время находится в промышленной эксплуатации в руднике «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» при отработке запасов на глубине свыше 1300 метров.

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

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

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

На основании результатов исследований разработан программный модуль «Теплофизика», интегрированный в аналитический комплекс «АэроСеть», предназначенный для прогнозирования теплового режима глубоких рудников и имитационного модели-

рования работы шахтных систем кондиционирования воздуха. Аналитический комплекс «АэроСеть» используется в проектных институтах ОАО «Институт «Уралгипроруда», ОАО «Галургия», ООО «Институт «Гипроникель», ООО «ТОМС-Проект», ООО «СПб-Гипрошахт», ООО «Забайкалзолотопроект».

Связь работы с крупными научными программами и темами

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

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

Апробация работы

Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях ГИ УрО РАН (Пермь, 2011-2018 гг.), на

международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2012-2015, 2019 гг.), на международной научно-практической конференции «Аэрология и безопасность горных предприятий» (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2012 г.), на II и III Всероссийской научно-практической конференции «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (г. Якутск, ИГДС СО РАН, 2013, 2015 и 2017 гг.), на II и III международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятия минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2014 и 2016 гг.), на Всероссийском молодежном форуме «Нефтегазовое и горное дело» (Пермь, ПНИПУ, 2011 и 2012 гг.), на Всероссийской научно-практической конференции «Развитие Арктики и приполярных регионов» (г. Екатеринбург, УрФУ имени Б.Н. Ельцина, 2014 г.), на V Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий» (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2014), на 42-ой международной летней школе «Advanced Problems in Mechanics 2014» (г. Санкт-Петербург, СПбГУ, 2014 г.), на I Международной научно-практической конференции «Горная электромеханика — 2014» (г. Пермь, ПНИПУ, 2014 г.), на II Международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика — 2015» (г. Пермь, ПНИПУ, 2015 г.), на IX Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2015 г.), на Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена — 2015» (г. Новосибирск, ИГД СО РАН, 2015 г.), на Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию горного факультета «Горное дело в XXI-веке: технологии, наука, образование» (г. Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2015 г.), на научно-технических советах рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», института ООО «Гипроникель», проектного института АО «Галургия», руднике Гремячинского ГОК и управлении ООО «ЕвроХим», рудниках и управлении ОАО «Беларуськалий» в 2011-2018 годах.

Личный вклад автора

При непосредственном участии автора проведена постановка задач, разработка математических моделей, экспериментальные исследования в шахтных условиях, анализ и обработка полученных данных, теоретические исследования и создание программных продуктов, выполнение расчетов и проведение численных экспериментов,

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

Практические эксперименты и внедрение результатов исследований, запуск в промышленную эксплуатацию разработанных технологий и технических средств регулирования теплового режима были бы невозможны без содействия генерального директора ОАО «Беларуськалий» Головатого И.И., заместителя начальника Горного управления ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» Мизонова Е.Н. и директора ООО «НПО «АэроСфера» Бутакова С.В.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю профессору Казакову Б.П. за формирование научного направления работы, д-ру техн. наук Левину Л.Ю. за создание уникальной среды для исследований и внедрения результатов работы, д-ру техн. наук Шалимову и канд. техн. наук Сёмину М.А. за помощь в разработке математических моделей и их программной реализации.

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

Публикации

По теме диссертации опубликованы 43 научные работы, в том числе 22 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Минобрнауки РФ, из них 8 в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science.

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

Объем работы

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

1. МИКРОКЛИМАТ ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ И СПОСОБЫ ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

1.1. Тепловой режим горных выработок глубоких рудников

Тепловой режим горных предприятий определяется температурой, скоростью движения и относительной влажностью воздуха в горных выработках, является одним из производственных факторов и должен обеспечивать безопасность труда и сохранение здоровья горнорабочих.

Условия ведения работ в выработках шахт и рудников, расположенных в области положительных температур массива горных пород с обычными для них водоприотками для обеспечения безопасности, требуют предотвращения замерзания воды и образования наледей, которые могут препятствовать нормальной работе транспорта и приводить к авариям. Кроме того, в зимний период времени подача воздуха с отрицательной температурой в стволы может привести к обмерзанию крепи ствола и нарушению ее эксплуатационных характеристик. Для исключения этих случаев действующими Федеральными нормами и правилами «Правила безопасности при ведении горных работ ...» предусматривается подача воздуха в горные выработки с температурой не ниже +2 °С [126].

Верхние пределы значений микроклиматических параметров воздуха в выработках при ведении горных работ в зоне с высокой температурой массива горных пород определяются из условий обеспечения нормальной терморегуляции людей при наличии спецодежды и выполнении ими работы заданной тяжести. Определенная тенденциозность подхода к определению верхнего предела микроклимата выработок в разных странах мира или недостаточная научная обоснованность способствуют широкому диапазону предельных параметров микроклимата и их количественным значениям. В нашей стране по требованиям действующих Федеральных норм и правил «Правила безопасности при ведении горных работ ...» температура воздуха в действующих выработках рудников не должна превышать +26 °С [126].

Высокая температура воздуха в подземных рабочих зонах не только отрицательно сказывается на здоровье горнорабочих, снижении производительности труда и увеличении травмоопасности производства, но и часто приводит к невозможности осуществления непосредственно технологии добычи, например, увеличивая количество простоев технологического оборудования из-за недостаточного охлаждения или отказов при ведении взрывных работ.

Практический опыт на глубоких рудниках показал, что кондиционирование рудничного воздуха и улучшение микроклиматических условий в подземных рабочих зонах позволяет: уменьшить число несчастных случаев, увеличить производительность труда горнорабочих, уменьшить число отказов при ведении взрывных работ, управлять тепловыми депрессиями и улучшить проветривание отдельных рабочих зон и всего рудника в целом, снижать потребление сжатого воздуха [98].

Одним из основных факторов, формирующих тепловой режим шахт и рудников, является теплообмен между горными породами и рудничным воздухом. Без использования технических мероприятий по регулированию теплового режима, разница между температурой пород и воздуха отсутствует уже практически на расстоянии 1,5...2 километров от мест пересечений воздухоподающих стволов с горизонтами. С глубиной возрастает температура горных пород, и, как правило, с глубины 1 километра и более начинает достигать +26 °С, а значит возникает необходимость применения мероприятий по обеспечению нормативно требуемых температур рудничного воздуха.

В прошлом веке ряд рудников, обрабатывающих глубокие залежи, столкнулись с описанными проблемами. Имеются данные обширных наблюдений и исследований на рудниках СССР, стран ближнего и дальнего зарубежья [98,172]. В таблице 1.1 представлены результаты геотермии глубоких месторождений [172].

Таблица 1.1 — Геотермия глубоких месторождений (по Ю.В. Шувалову)

Месторождение, рудник	Полезное ископаемое	Глубина работ, м	Температура пород, до °С
Тагило-Кушвинские (Урал)	Железо	1200	+25
Норильский промышленный район (Таймырский полуостров)	Медь, никель	1300	+39
Текели (Казахстан)	Полиметаллы	1100	+37
Таштагол (Горная Шория)	Железо	1100	+20
Кривой Рог (Украина)	Железо	1000	+25
Садон (Северная Осетия)	Полиметаллы	1000	+40
Севуралбокситруда (Урал)	Боксит	1000	+20
Донбасс (Украина)	Уголь	1200	+45

Среди глубоких рудников дальнего зарубежья наиболее остро проблема высоких температур воздуха подземных рабочих зон встречается на рудниках южноафриканской республики (ЮАР). Имеющиеся данные по рудникам Ранда (района Витва-

терсранда) свидетельствуют о том, что с глубины 750 метров температура породного массива начала превышать +25 °С и условия труда горнорабочих стали некомфортными. При дальнейшем углублении горных работ до 2000 метров без применения специальных мероприятий температурные условия стали невыносимо тяжелыми — температура пород равнялась +35 °С. На сегодняшний день горные работы ведутся на отметке 3000 метров, где температура массива составляет приблизительно +50 °С и вести горные работы без использования систем кондиционирования воздуха невозможно.

Трудности с обеспечением требуемых микроклиматических условий при подземной добыче руды происходили и происходят на рудниках Бразилии [101], Федерации Родезии и Ньясаленда [218], Индии и Ганы [101,189,192].

Значительный опыт ведения горных работ в условиях глубоких и сверхглубоких залежей и высоких температур породного массива приобретен в ходе отработки месторождения сульфидно-никелевых руд района Садбери в Канаде [98,227].

В пределах стран СНГ особую остроту представленные проблемы приобретают при вскрытии и отработке залежей богатых и медистых руд месторождений ПАО «ГМК «Норильский никель», обрабатываемых рудниками «Таймырский» и «Комсомольский» (шахты «Скалистая» и «Глубокая»), на калийных рудниках ООО «ЕвроХим» (подземный рудник Гремячинского ГОК) и ОАО «Беларуськалий» (отработка залежей IV калийного горизонта), на металлических рудниках ОАО «СУБР» (шахта «Черёмуховская-Глубокая») и ООО «УГМК-Холдинг» (подземный рудник Гайского ГОК). Имеющиеся данные измерений температур массива горных пород и воздуха в рабочих зонах свидетельствуют о значительных превышениях допустимых значений и неблагоприятной микроклиматической обстановке (см. таблицу 1.2).

Таблица 1.2 — Измеренные температуры горных пород и воздуха в рабочих зонах современных горнодобывающих предприятий

Месторождение, рудник	Глубина, м	Температура массива, °С	Температура воздуха в рабочих зонах, °С
Шахта «Глубокая» ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель»	2000	+53	—
Рудник «Таймырский» ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель»	1700	+38	+45
Рудник 4 РУ ОАО «Беларуськалий»	850	+24	+35

Месторождение, рудник	Глубина, м	Температура массива, °С	Температура воздуха в рабочих зонах, °С
Рудник Гремячинского ГОК ООО «Еврохим-ВолгаКалий»	1100	+32	+29

Дальнейшая тенденция увеличения разветвленности сетей горных выработок современных шахт и рудников, роста интенсивности ведения горных работ и их глубины с неизбежностью обострит вышеуказанные проблемы.

Существующий практический опыт регулирования теплового режима и выполненные предпроектные работы по разработке систем кондиционирования воздуха при отработке перспективных глубокозалегающих запасов показали, что реализация любых мероприятий по снижению температуры воздуха в горных выработках связана со значительными капитальными и эксплуатационными затратами. В современных рыночных условиях дополнительные расходы, связанные с внедрением систем нормализации микроклиматических условий, приводят не только к снижению конкурентоспособности предприятия, но и зачастую делают нецелесообразной отработку новых глубокозалегающих запасов полезных ископаемых. Таким образом, современные условия накладывают крайне высокие требования к технико-экономическому обоснованию разрабатываемых технических решений. Эти решения, с одной стороны, должны обеспечивать безопасные условия труда, а с другой — отличаться минимальными капитальными и эксплуатационными затратами.

Проблемы регулирования и обеспечения требуемых микроклиматических параметров атмосферы в подземных рабочих зонах глубоких шахт и рудников вызвали интенсивное развитие исследований в данном направлении в начале 40-х годов XX века. Проведены обширные исследования теплофизических процессов, формирующих тепловой режим шахт и рудников, а также разработаны методы прогноза термовлажностных параметров атмосферы горных выработок. Решению этих вопросов посвящены работы О.А. Кремнева [176], А.Н. Щербаня [178], А.Ф. Воропаева [31], К.В. Кочнева, Ю.Д. Дядькина [52], Ю.В. Шувалова [172], С.Г. Гендлера [39], Э.И. Баратова [181], Б.И. Медведева [107], Б.Д. Чижова [169], В.Я. Журавленко [59], В.А. Богдавленского [14], Г.В. Дуганова [47], М.Д. McPherson, К.Л. Gibson, S.J. Bluhm, L. Maskay и других исследователей.

В формировании теплового режима рудника участвует множество факторов, и при прогнозных расчетах распределения термовлажностных параметров рудничной ат-

мосферы необходима количественная оценка каждого. Анализ литературных источников [30,98,176,177,179] позволил выделить следующие основные факторы, влияющие на формирование теплового режима глубоких шахт и рудников:

1. Температура породного массива, определяемая геотермией участка, и процессы теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом.
2. Температура воздуха на поверхности.
3. Гидростатическое сжатие/расширение воздуха при его движении по вертикальным или наклонным горным выработкам.
4. Процессы влагообмена.
5. Окислительные процессы.
6. Местные источники теплоты — взрывные работы, горные машины с ДВС, электрическими приводами, трубопроводы сжатого воздуха и твердеющие закладочные массивы.

Вклад тех или иных факторов различен в зависимости от геологических и горно-технических особенностей, климатических условий региона расположения горного предприятия [179].

В таблице 1.3 приведены данные ряда авторов, характеризующие составляющие теплового баланса горных выработок глубоких и сверхглубоких рудников различных месторождений.

Таблица 1.3 — Составляющие теплового баланса горных выработок

Район	Глубина работ, м	Составляющие теплового баланса, %				
		Породный массив	Окисление пород	Компрессия	Машины	Прочие
Витватерсранд	1000	13	—	22	35	30
	2000	35	—	30	20	15
	3000	42	—	35	18	5
	2500	50-55	—	—	20-30	15
Orange free State	1000	45	—	25	15	15
	2000	50	—	35	10	5
	3000	55	—	40	4	1
	3000	60-65	—	—	15-20	15
Норильск	1000	30	10	20	30	10
	2000	40	12	22	20	6
	1000	40-50	15-20	—	20-30	—
	1500	45-55	18-20	—	18-25	—

С учетом представленного обзора проведен более детальный анализ состояния вопроса прогноза и регулирования теплового режима глубоких рудников по следующим направлениям:

- в разделе 1.2 представлен мировой опыт нормирования микроклиматических условий и организации труда при повышенных температурах рудничного воздуха;
- в разделе 1.3 рассмотрены методы прогнозирования микроклиматических параметров воздуха в горных выработках глубоких рудников;
- в разделе 1.4 представлены существующие способы нормализации микроклиматических условий, опыт их внедрения и современные направления обеспечения ресурсосбережения при регулировании теплового режима шахт и рудников.

1.2. Нормирование микроклиматических условий в горных выработках

В данном разделе рассмотрена современная нормативная база, регламентирующая микроклиматические условия и режим работы персонала на горных предприятиях нашей страны и зарубежья.

1.2.1. Требования к микроклиматическим условиям на отечественных горнодобывающих предприятиях

На горных предприятиях Российской Федерации нормирование микроклиматических параметров регламентируется следующими документами:

1. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых [126].
2. Правила безопасности при разработке нефтяных месторождений шахтным способом [43].
3. Санитарные нормы и правила СанПиН 2.2.4.548-96 «Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [135] — в угольных шахтах согласно Правилам безопасности [127].

Согласно пункту 155 «Правил безопасности при ведении горных работ ...» температура воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок и на рабочих местах с постоянным присутствием персонала не должна превышать +26 °С. При температуре воздуха свыше +26 °С должно предусматриваться его охлаждение или разраба-

тываться мероприятия, предусматривающие режим работы персонала с перерывами на отдых в специально оборудованных местах с температурой воздуха не выше +26 °С.

Отдельно осуществляется нормирование температур воздуха в нефтяных шахтах, использующих термошахтный способ добычи [43]. Специфика способа добычи заключается в необходимости нагрева массива горных пород при помощи пара до температур +100 °С и выше. В таких условиях обеспечение требуемой температуры воздуха +26 °С является либо невозможным, либо сопряжено со значительными затратами. Кроме того, при термошахтной добыче нефти не требуется постоянного присутствия горнорабочих в добычных выработках (буровых галереях), поэтому правилами безопасности допускается температура воздуха до +36 °С при условии продолжительности пребывания рабочих не более 1 часа и не больше 3-х раз за смену.

В угольных шахтах для нормирования микроклиматических условий используется СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений», применяющийся для поверхностных производственных помещений. Согласно этому документу, допустимые температуры и скорости движения воздуха определяются в зависимости от периода года и категории работ по энергозатратам. Например, для теплого периода года верхние допустимые значения микроклимата представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 — Допустимые значения микроклиматических параметров воздуха для угольных шахт согласно СанПиН 2.2.4.548-96

Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Скорость движения воздуха, м/с, не более
Ia (до 139)	24,1-25,0	0,1
Iб (140-174)	23,1-24,0	0,2
IIa (175-232)	21,1-23,0	0,3
IIб (233-290)	19,1-22,0	0,4
III (более 290)	18,1-21,0	0,4

Также при использовании допустимых величин микроклимата на рабочих местах дополнительно ограничивается перепад температур:

- не более 3 °С по высоте;
- не более 4 °С, 5 °С и 6 °С при I, II и III категориях работ соответственно по горизонтали и в течение смены.

Кроме этого, разрешается превышение температуры допустимых значений при условии ограничения времени работы.

На рисунке 1.1 в наглядном виде представлены допустимые области температуры и скорости движения воздуха согласно различным нормативным документам. При этом привязка нормативных документов идёт только к типу добываемого полезного ископаемого, без учета глубины ведения горных работ или иных теплофизических особенностей предприятия.

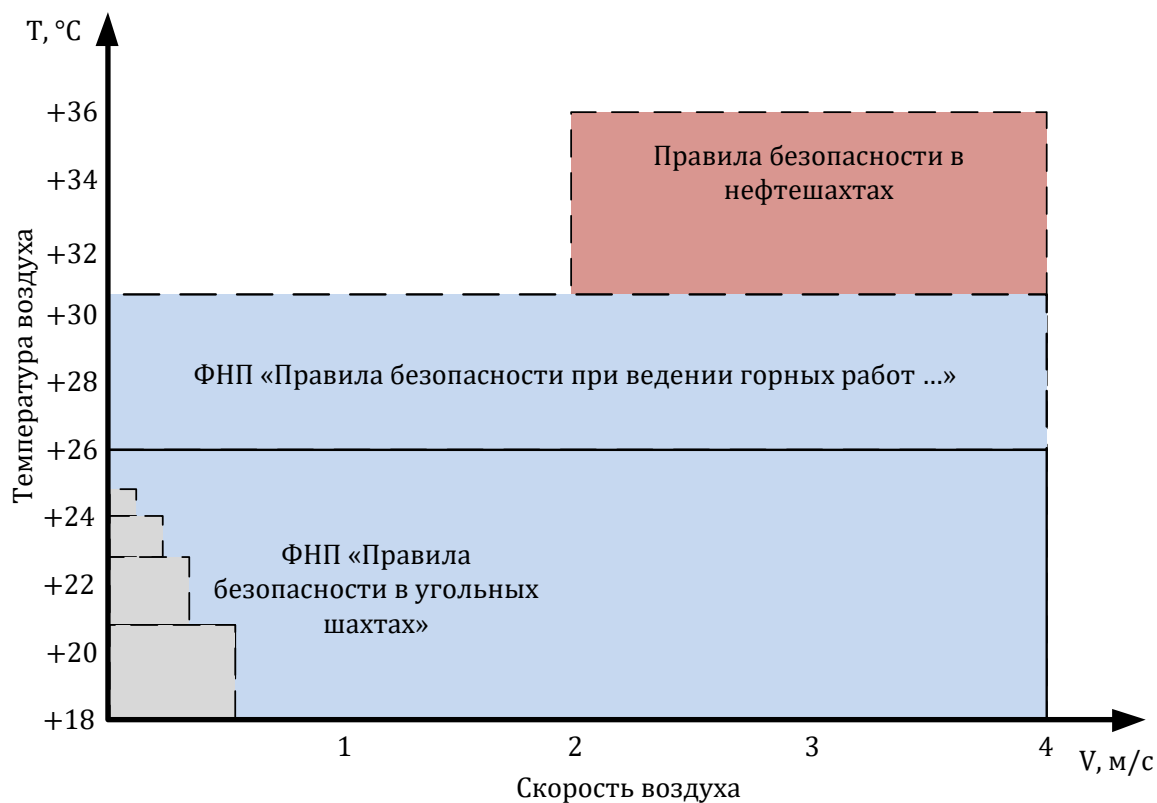


Рисунок 1.1 — Сравнение диапазонов допустимых микроклиматических параметров в горных выработках, представленных в различных нормативных документах

С точки зрения комфортности тепловых ощущений и безопасности микроклиматических условий необходим учет комплексного влияния параметров воздуха: температуры сухого термометра, относительной влажности и скорости движения. Данный момент либо не учитывается, либо крайне слабо учитывается в действующих нормативных документах, что можно наглядно продемонстрировать при помощи понятия эффективной температуры. Эффективной температурой называется все бесчисленные комбинации из температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, вызывающие одинаковые тепловые ощущения у человека, причем такие, которые возникают в неподвижном, полностью насыщенном влагой воздухе при температуре, численно равной эффективной. Например, используемой в «Правилах безопасности при ведении горных работ ...» температуре воздуха по сухому термометру +26 °C может

соответствовать существенно разный диапазон эффективных температур и, соответственно, тепловых ощущений горнорабочих.

В таблице 1.5 приведены значения микроклиматических параметров, соответствующие требованиям существующих «Правил безопасности при ведении горных работ ...» [126], но весьма отличающихся по значениям эффективных температур. Кроме того, приведены значения набора микроклиматических параметров, соответствующих эффективной температуре +26 °С.

Таблица 1.5 — Микроклиматические параметры воздуха, соответствующие одинаковой температуре сухого термометра и эффективной температуре воздуха

Температура воздуха, °С	+26	+26	+26	+28	+30
Относительная влажность, %	0	50	100	100	100
Скорость движения воздуха, м/с	3,5	1,5	0	1,3	3,5
Эффективная температура, °С	+17	+20	+26	+26	+26

Таким образом, действующие нормативные требования к микроклиматическим параметрам воздуха на горных предприятиях нашей страны не учитывают этих важных особенностей, в связи с чем разработка современной и гибкой системы нормирования микроклиматических параметров является актуальной задачей.

Для решения этой задачи целесообразно рассмотреть зарубежный опыт нормирования микроклиматических условий.

1.2.2. Зарубежный опыт нормирования микроклиматических условий

На зарубежных горных предприятиях микроклиматические условия нормируются наиболее прогрессивно [208,194,221,195,222,196] с использованием комплексных показателей, учитывающих температуру, скорость движения и относительную влажность воздуха. Согласно [194], существуют около 60 различных показателей и регулирующих документов, характеризующих опасность рудничной атмосферы по тепловому фактору. Все эти показатели делятся на две группы:

- эмпирические показатели (Empirical index), которые разрабатываются в ходе экспериментальных наблюдений и выражаются через микроклиматические параметры рудничной атмосферы, а не физиологические параметры организма человека. К ним относятся эффективная и ощущаемая температуры воздуха, Оксфордский индекс, кататемпература, температура воздуха по влажному термометру, WBGT-индекс и ряд других.

— рациональные показатели (Rational index), которые нормируют тепловые условия атмосферы, исходя из физиологической нагрузки на человека. К ним относятся температура тела, средневзвешенная температура кожи, прогнозируемый уровень потоотделения, частота сердечных сокращений и другие комплексные физиологические параметры.

Разработка универсального показателя, объективно описывающего опасность рудничной атмосферы по тепловому фактору, крайне затруднительна из-за влияния множества факторов и условий: свойств спецодежды, влияющих на лучистый и конвективный теплообмен организма с окружающей средой, акклиматизационные возможности организма и т.д.

В Австралии для нормирования микроклиматических условий в промышленности используется TWL-индекс. Данный индекс характеризует теплосъем с поверхности тела рабочего. Допустимые значения TWL-индекса и рекомендуемые мероприятия по обеспечению исключения вредного воздействия на организм человека приведены в таблице 1.6 [194].

Таблица 1.6 — Рекомендуемые мероприятия в зависимости от значения TWL-индекса на рабочем месте

TWL-индекс, Вт/м ²	Название	Мероприятия
115, или температура воздуха по сухому термометру +44 °С, или температура воздуха по влажному термометру +32 °С	Запрещающий	Работа в нормальном режиме запрещается и допускается только в чрезвычайных ситуациях (может выполняться только с разрешения уполномоченного руководителя). Проводится тест на обезвоживание организма в конце смены. Рабочие должны быть обеспечены водой (не менее 4 литров) в течении всей смены
115...140	Остановочный	Нормализация проветривания и ротации рабочих (при возможности). Запрещается работа в одиночку. Обеспечивается скорость движения воздуха не ниже 1 м/с. Проводится тест на обезвоживание организма в конце смены.

TWL-индекс, Вт/м ²	Название	Мероприятия
		Рабочие должны быть обеспечены водой (не менее 4 литров) в течение всей смены.
140...220	Акклиматизационный	Рабочие должны быть обеспечены водой (не менее 4 литров) в течение всей смены
больше 220	Неограниченный	Работа без ограничений по фактору теплоты

В Австралии для рудников приняты следующие пределы микроклиматических параметров [194]:

- для рабочих зон скорость движения воздуха должна быть не ниже 0,5 м/с, температура сухого воздуха не должна превышать +36 °С, или TWL-индекс не должен превышать 220 Вт/м² (ему соответствует температура воздуха по влажному термометру +25 °С, температура воздуха по сухому термометру +36 °С, скорость движения воздуха 0,5 м/с);
- для постоянных подземных рабочих мест TWL-индекс должен быть не ниже, чем 220 Вт/м² (должны поддерживаться следующие микроклиматические условия: температура воздуха по влажному термометру +20 °С, температура воздуха по сухому термометру +30 °С, скорость движения воздуха 0,2 м/с);
- для кабин машин, оборудованных кондиционерами, температура воздуха по сухому термометру должна поддерживаться в интервале от +22 °С до +27 °С.

В Германии нормирование микроклиматических условий осуществляется согласно документу [208]. Основные требования, представленные в данном документе, приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 — Требования к микроклимату на рудниках Германии

Температура, °С		Длительность смены, часов	Длительность рабочего времени, часов	Время перерыва, минут
По сухому термометру	Эффективная			
≤ +28 °С	≤ +25 °С	8	—	—
> +28 °С	> +25 °С	8	6	—
	> +29 °С	8	5	10
		Работы только под наблюдением		
	> +30 °С	8	5	20

	> +32 °С	Работы запрещены
--	----------	------------------

На горных предприятиях Великобритании, согласно источнику [196], для нормирования микроклиматических параметров применяется эффективная температура воздуха, предельное значение которой ограничивается +30 °С.

В таблице 1.8 приведены требования к микроклиматическим параметрам воздуха в горных выработках шахт Великобритании и мероприятия по проведению работ, соответствующие различным микроклиматическим условиям.

Таблица 1.8 — Требования к микроклимату горных выработок в Великобритании

Температура	Мероприятия
Температура воздуха по влажному термометру больше +25 °С	Должна быть обеспечена скорость движения воздуха не ниже 0,5 м/с
Эффективная температура воздуха больше +28 °С	Работы допускаются с ограничениями
Эффективная температура воздуха больше +30 °С	Работы не допускаются

Для определения эффективной температуры используется номограмма, приведенная на рисунке 1.2.

Согласно требованиям NIOSH (США), предельные значения тепловой нагрузки на организм рабочего не должны превышать следующих величин (см. рисунок ниже). При этом для нормирования используется WBGT-индекс [221] (Wet bulb globe temperature).

Согласно требованиям организации ACGIH (США) максимальные температуры ограничиваются +26,7 °С для умеренного темпа работы и +30 °С для работ в легком темпе [195]. Согласно документу [222], описывающему результаты исследований по определению индексов тепловой нагрузки окружающей среды, рабочие могут производить работы без ограничений до температуры воздуха +27,5 °С по влажному термометру.

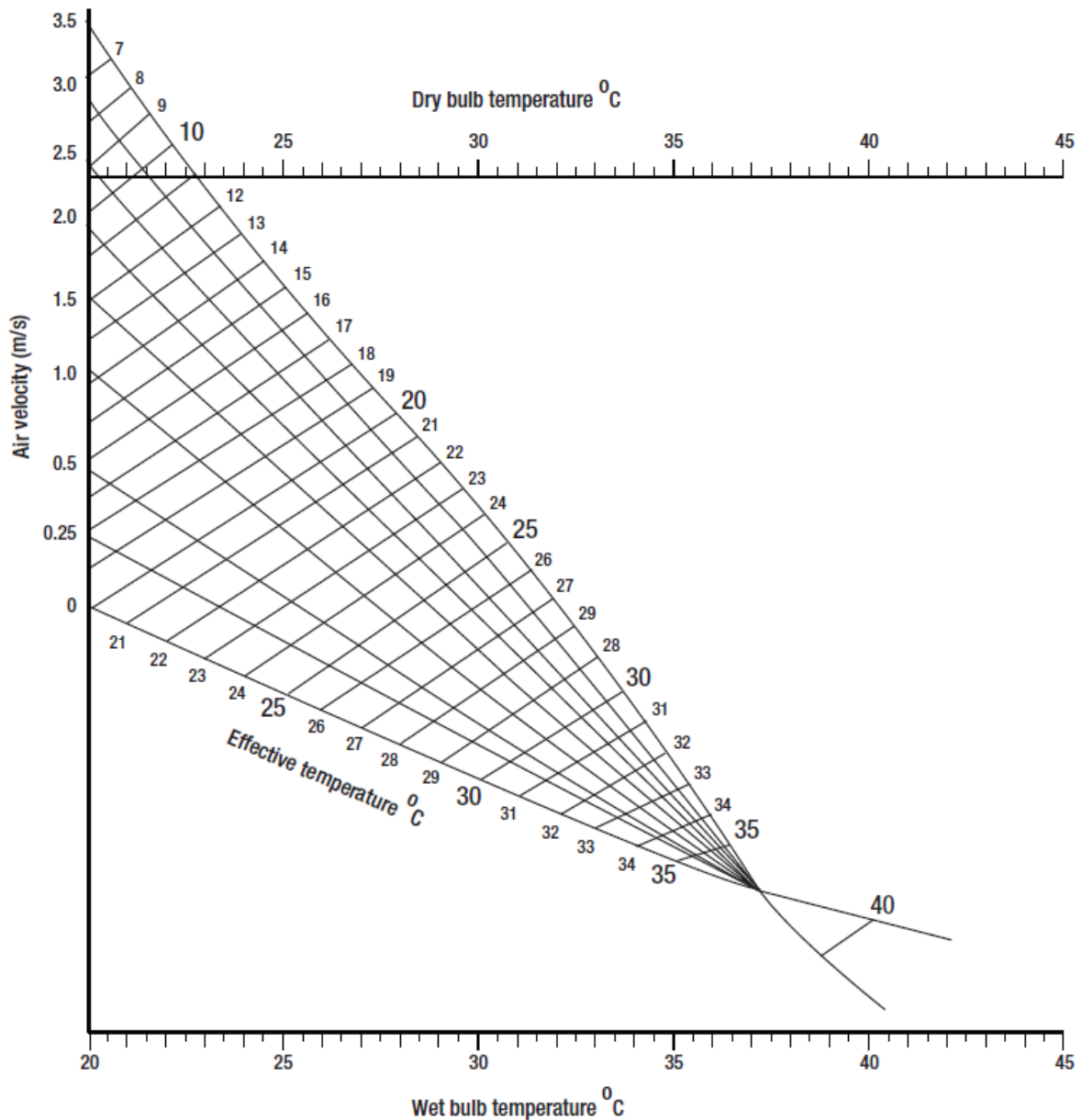


Рисунок 1.2 — Номограмма для определения эффективной температуры

На калийных рудниках ОАО «Беларуськалий» микроклиматические параметры в горных выработках регламентируются следующими нормативными документами:

- Правила технической безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь [1].
- Санитарные нормы, правила и гигиенические требования к микроклимату при проектировании и эксплуатации калийных рудников [2].

Требования к температуре воздуха в «Правилах технической безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь» [1] представлены в пункте 171 следующим образом: «Температура воздуха в подготовительных, очистных и других действующих выработках не должна превышать +26 °С.

При температуре свыше +26 °С должны приниматься меры по ее снижению или улучшению микроклимата на рабочих местах». Данная формулировка в неявном виде допускает превышение температуры воздуха свыше установленных +26 °С при улучшении микроклимата за счет, например, увеличения скорости и снижения относительной влажности воздуха.

Вторым действующим документом, нормирующим микроклиматические условия в горных выработках калийных рудников РБ, являются «Санитарные нормы, правила и гигиенические требования к микроклимату при проектировании и эксплуатации калийных рудников» [136]. Допустимые нормативные сочетания температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха на рабочих местах приведены в таблице 1.9.

Таблица 1.9 — Допустимые нормативные сочетания температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха на рабочих местах в калийных рудниках

Показатели	Сочетания параметров		
	1	2	3
Температура воздуха, °С	16-19	20-23	24-26
Относительная влажность воздуха, %	75-30	75-30	65-30
Скорость движения воздуха, м/с	0,15-0,25	0,3-0,5	0,6-1,0

Приведенные требования не являются категоричными с точки зрения выполнения, допускается превышение температуры воздуха при условиях ограниченного времени пребывания в зависимости от категории работ. Время пребывания на рабочих местах при температурах воздуха выше допустимых величин приведено в таблице 1.10.

Таблица 1.10 — Время пребывания на рабочих местах при температуре воздуха выше допустимых величин

Температура воздуха на рабочем месте, °С	Время пребывания, часов		
	Категория Ia-IIб	Категория IIа-IIб	Категория III
+32,5	1	—	—
+32	2	—	—
+31,5	2,5	1	—
+31	3	2	—
+30,5	4	2,5	1
+30	5	3	2

Температура воздуха на рабочем месте, °С	Время пребывания, часов		
	Категория Ia-IIб	Категория IIa-IIб	Категория III
+29,5	5,5	4	2,5
+29	6	5	3
+28,5	7	5,5	4
+28	8	6	5
+27,5	—	7	5,5
+27	—	8	6
+26,5	—	—	7
+26	—	—	8

Категории устанавливаются для разграничения работ по тяжести на основе общих энергозатрат организма следующим образом:

- Легкие физические работы (категории Ia-IIб) охватывают виды деятельности, при которых расход энергии составляет 120-150 ккал/час и не требуют либо сопровождаются некоторым физическим напряжением.
- Физические работы средней тяжести (категории IIa-IIб) охватывают виды деятельности, при которых расход энергии составляет от 151 до 250 ккал/час и сопровождаются умеренным физическим напряжением.
- Тяжелые физические работы (категория III) охватывают виды деятельности, при которых расход энергии превышает 250 ккал/час, они связаны с постоянными передвижениями, перемещением и переноской значительных (массой свыше 10 кг) грузов и требуют больших физических усилий и (или) пребывания в вынужденном положении теплоты свыше 50 % времени смены.

Таким образом, в действующем документе «Санитарные нормы, правила и гигиенические требования ...» осуществляется более гибкое и научно-обоснованное нормирование микроклиматических параметров воздуха с учетом защиты временем от вредного теплового фактора. Вероятнее всего, «Санитарные нормы, правила и гигиенические требования к микроклимату при проектировании и эксплуатации калийных рудников» разработаны Министерством здравоохранения Республики Беларусь на основе Санитарных норм и правил «Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях» [134]. Данный документ используется для нормирования микроклиматических параметров воздуха в производственных помещениях поверхностных сооружений. В силу статуса этого документа можно предположить, что

приведенные в нем требования научно обоснованы значительным объемом медицинских исследований. При этом документ нормирует все три основных микроклиматических параметра — температуру, относительную влажность и скорость. В таблице 1.11 приведены допустимые микроклиматические параметры воздуха для теплого периода времени года, согласно действующему СанПиН РБ.

Таблица 1.11 — Допустимые микроклиматические параметры воздуха теплого периода времени года для работ различной категории

Категория работ	Допустимая температура, °С	Допустимая относительная влажность, %	Допустимая скорость движения, м/с
Легкая — Ia	+28	75	0,1-0,2
Легкая — Ib	+28	75	0,1-0,3
Средней тяжести — Pa	+27	75	0,2-0,4
Средней тяжести — Pb	+27	75	0,2-0,5
Тяжелая — III	+26	75	0,2-0,5

В нем также содержится время пребывания на рабочих местах при температуре воздуха выше допустимых величин для обеспечения защиты временем.

Проведенный анализ показывает, что практически все используемые системы нормирования микроклиматических условий в горных выработках учитывают комплексное влияние скорости движения и относительной влажности воздуха. Кроме того, при превышении допустимых норм применяются дополнительные мероприятия, такие как ограничение времени работ, организация перерывов, обеспечение рабочих водой и т.д.

Таким образом, в рамках разработки систем нормализации микроклиматических параметров воздуха в горных выработках целесообразно исследовать и обосновать систему нормирования микроклиматических условий, не только учитывающую комплексное влияние микроклиматических параметров на тепловые ощущения, но и предусматривающую использование организационных мероприятий, например, ограничение времени работы при температурах выше допустимых.

1.3. Методы прогнозирования микроклиматических параметров рудничного воздуха

Развитие методов прогнозирования микроклиматических параметров рудничной атмосферы можно разделить на два этапа, связанных с развитием вычислительной тех-

ники. Первый этап приходится на 30-70-е годы прошлого века и характеризуется значительным развитием эмпирических, эмпирико-аналитических и аналитических методов [52,30,98,179,181], их рассмотрению посвящен раздел 1.3.1.

Второй этап связан с периодом интенсивного развития вычислительной техники и численных методов расчета [49,74,153] и появлением современных способов прогноза микроклиматических параметров в горных выработках. Их рассмотрению посвящен раздел 1.3.2.

1.3.1. Аналитические методы

Начальные этапы развития методов прогноза теплового режима и микроклиматических параметров рудничного воздуха основаны на методах приближенного решения задач тепломассообмена в рудничной атмосфере и породном массиве. Отсутствие возможности решения сопряженных задач, учитывающих взаимное влияние теплообмена, действия источников тепловыделения различной природы, фазовых переходов и других сложных термодинамических процессов привело к возникновению методов расчета на базе составления балансовых уравнений теплоты для участков вентиляционной сети с последующими попытками оценки каждого из слагаемых баланса при помощи полуэмпирических формул.

В работе [178] А.Н. Щербанем на основании большого количества опытных данных предлагается учитывать изменение температуры рудничного воздуха для различных шахт с помощью коэффициента удельного приращения температуры от местных источников теплоты.

В работе [30] А.Ф. Воропаева, продолжающего исследования А.Н. Щербаня, произведено разделение источников теплоты на две группы. К первой группе отнесены абсолютные источники теплоты, приращение которых условно не зависит от температуры воздуха, — к ним отнесены окислительные процессы, сжатие воздуха, работа электрических и дизельных приводов. Ко второй группе относятся относительные источники теплоты, теплоотдача которых зависит от температурного напора — разности температур воздуха и источника, — к ним отнесены породный массив, полезное ископаемое, шахтная вода, вентиляционные и водяные трубопроводы. В этой же работе на основании уравнения теплового баланса авторами получено дифференциальное уравнение относительно искомой функции изменения температуры воздуха при его движении по горной выработке. Конечная формула для расчета температуры воздуха имеет вид [30]

$$t = t_0 \cdot e^{-AB} + L \cdot \sigma \cdot \sin\beta + (1 - e^{-AB}) \left(t_{n(0)} - \frac{L \cdot \sigma \cdot \sin\beta}{AB} + \frac{\Delta t_{\text{абс}}}{B} \right),$$

$$B = \frac{k_{\tau} \cdot u \cdot L}{1080 \cdot Q'}$$

где A — безразмерный тепловой коэффициент влагообмена;

L — длина горной выработки, м;

σ — геотермический градиент, имеет положительное значение вниз от начала выработки и отрицательное — вверх от ее начала, °С/м;

β — угол наклона выработки, град;

k_{τ} — коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/м²·°С;

u — периметр выработки, м;

Q — объемный расход воздуха в выработке, м³/с;

$\Delta t_{\text{абс}}$ — приращение воздуха от абсолютных источников теплоты (°С), определяется как сумма приращения теплоты от процессов окисления, сжатия воздуха и местных источников тепловыделения соответственно

$$\Delta t_{\text{абс}} = \Delta t_{\text{ок}} + \Delta t_{\text{сжм}} + \Delta t_{\text{м}}.$$

Впоследствии различными исследователями были предложены аналогичные методы для прогноза теплового режима, включающие, помимо аналитических формул, графоаналитические способы определения температуры воздуха [46,98]. Каждая из предложенных методик разработана для условий определенного типа рудников и имеет ограниченную область применения.

Ряд современных исследователей и инженеров широко используют эти и подобные полуэмпирические формулы для расчета теплового режима рудников сложной топологии. Для этого формулы программируются и расчет автоматизируется, требуется только ввод исходных данных [104].

Детальные исследования тепловых процессов и прогноза теплового режима выполнены Ю.Д. Дядькиным для условий рудников Севера, в том числе расположенных в криолитозоне [53]. Им проведен фундаментальный анализ термодинамических процессов, протекающих в рудничной атмосфере и породном массиве, сформулирована математическая задача и предложен численный алгоритм ее решения в сети горных выработок и окружающем их массиве. Автором предложены приближенные аналитические методы тепловых расчетов рудничного воздуха и приконтурной части массива, поскольку работы опередили свое время и не могли быть программно реализованы для получения решения с использованием численных методов.

При решении задач горной теплофизики для моделирования температурного поля массива используются упрощенные модели [11]. Делается приближение отсутствия источников (стоков) теплоты, при этом горный массив рассматривают радиально симметричным, однородным и, как правило, рассматривается только кондуктивная составляющая переноса. В действительности породный массив представляет сложную трехфазную среду, но строгое представление массива подобным образом влечет за собой усложнение процесса расчета. Кроме этого, зачастую невозможно выполнить параметрическое обеспечение сложных моделей, так как не существует достоверных способов определения распределения свойств горных пород в массиве. Поэтому в практических расчетах горные породы обычно рассматриваются как квазиоднородные среды, с эффективными теплофизическими характеристиками [97]. В некоторых исследованиях учитывается неоднородное распределение теплофизических свойств массива — например, в работе [237] рассматриваются случаи различных коэффициентов теплопроводности массива вдоль и поперек слоистости массива горных пород.

Первые исследования и попытки математического описания тепло- и массообменных процессов в шахтах и рудниках были предприняты в начале 1930-х годов нашими и зарубежными исследователями F. Jansen [204], G. Jeppe [205], H. Fritzsche [198], Б. Шточесом и Б. Черником [170]. Их модели представляли процесс теплообмена как стационарный процесс теплопередачи через толстостенную оболочку, толщина которой равна так называемой «тепловыравнивающей» рубашке, радиус которой равен зоне температурных возмущений в массиве горных пород из-за теплообмена с воздухом.

Физически корректное моделирование рудничного теплообмена между воздухом и горным массивом требует учета сопряженности полей температур массива и воздуха, для чего требуется решать соответствующие дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие теплоперенос в породном массиве и рудничном воздухе, с заданием соответствующих граничных условий на границе «массив — воздух». Дальнейшее развитие методов прогноза теплового режима основывается на решении уравнений подобного типа.

В горную теплофизику О.А. Кремневым введен коэффициент нестационарного теплообмена в качестве основного параметра, характеризующего изменение теплового взаимодействия рудничного воздуха и породного массива с течением времени

$$k_{\tau}(t) = \alpha \left(\frac{T_{cr}(t) - T_a}{T_m - T_a} \right), \quad (1.1)$$

где T_a — средняя в поперечном сечении выработки температура воздуха, °С;

$T_{ст}(t)$ — температура на стенке выработки, °С;

α — коэффициент теплоотдачи Ньютона, Вт/м²·°С.

Коэффициент нестационарного теплообмена связывает тепловой поток с разностью температур «непотревоженного» массива и рудничного воздуха. Таким образом, вся информация о теплораспределении и теплопередаче через пограничный слой, крепь, охлажденную зону горных пород «зашивается» в коэффициент нестационарного теплообмена, и искомый тепловой поток от массива к воздуху определяется следующим образом

$$q = k_{\tau}(T_m - T_a),$$

где T_m — температура «непотревоженного» массива, °С;

q — тепловой поток от породного массива к воздуху, Вт/м².

Также О.А. Кремнев предложил основную модель расчета распределения теплоты в породном массиве, при этом для моделирования температурного поля породного массива формулируется классическая цилиндрическая задача теплопроводности [11,117]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1.2)$$

$$T(r, 0) = T_{п} = const, \lim_{r \rightarrow \infty} T(r, t) = T_{п}, \quad (1.3)$$

$$\lambda \left[\frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=R_0} = \alpha(T(r, t) - T_B)_{r=R_0}, T_B = const, \quad (1.4)$$

где r — радиальная координата, м;

t — время, с;

χ — коэффициенты температуропроводности пород массива, м²/с;

λ — коэффициент теплопроводности пород массива, Вт/м·с;

T_m — температура массива, °С;

T_a — температура воздуха, °С;

α — коэффициент теплообмена между стенкой выработки и шахтным воздухом, Вт/м²·°С.

Решение поставленной задачи осуществляется с помощью преобразования Лапласа по времени. Дальнейшие модели теплообмена строились аналогично многими авторами применительно к различным случаям [32,11,199,145].

Большое количество моделей расчета и исследований в горной теплофизике середины XX века основано на использовании данного модельного приближения коэффициента нестационарного теплообмена. Разработано несколько способов определения k_{τ} , которые условно можно разделить на две группы:

- Эмпирические, полученные в результате анализа статистических данных натуральных измерений и представленные, как правило, простыми математическими зависимостями. Однако данные зависимости имеют очень узкий круг применимости из-за привязанности к условиям проведения экспериментальных исследований, типу месторождений и рудников, поэтому широкого распространения не получили.
- Аналитические, базирующиеся на строгих решениях задачи сопряженного теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом, как правило, с помощью интегральных преобразований. Решение задачи получается в виде либо сложных функций (Бесселя, Неймана, Матье и других), либо в виде бесконечных рядов. При этом любое усовершенствование модели приводит, как правило, к значительному увеличению громоздкости окончательных выражений для коэффициента нестационарного теплообмена.

Существенное влияние на параметры вентиляционной струи оказывают процессы тепломассообмена, происходящие в выработках (процессы переноса пара и его конденсации, испарения влаги в массиве, на его поверхности и в воздухе). Тепловой режим основных видов горных выработок шахт, т.е. параметры влажного воздуха, их изменение вдоль выработок и со временем изучались на основе многочисленных тепловых съёмов [176,46]. Температура шахтного воздуха T_a вдоль вентиляционного маршрута в глубоких шахтах возрастает более выражено в холодный период года [176,46]. Сезонные колебания температуры атмосферного воздуха, подаваемого в шахту, достигают 30...35 °С, суточные — 15...20 °С. В глубоких шахтах эти температурные перепады нивелируются, в основном, на подходе вентиляционной струи к участку или лаве [11]. Повышение температуры воздуха вдоль выработок носит линейный (кусочно-линейный) характер [176,46]. Множество зависимостей для определения температуры воздуха, отличающихся способами приближенного задания величин зависимости влажностного содержания от длины выработки и температуры воздуха, предложены А.Н. Щерба-

нем [176,178], О.А. Кремневым [176,178], А.Ф. Воропаевым [31], К.В. Кочневым [80], Ю.Д. Дядькиным [52], Э.И. Баратовым [181], Б.И. Медведевым [107], Б.Д. Чижовым [169], В.Я. Журавленко [59], В.А. Богоявленским [14], Г.В. Дугановым [47] и другими исследователями.

Условия калийных рудников способствовали построению теорий теплообмена, учитывающих анизотропию теплофизических свойств породного массива по причине явно выраженной слоистости. Данному вопросу посвящены работы И.И. Медведева, А.Е. Красноштейна, Б.П. Казакова и Н.Д. Лужецкой [72,99,111]. В их работах произведено сравнение результатов, полученных методами А.Н. Щербаня и А.Ф. Воропаева, с натурными замерами, произведенными в калийных рудниках в горизонтальных горных выработках. В результате сравнения показано, что формула А.Н. Щербаня дает удовлетворительную сходимость результатов при вычислении изменения температуры массива по напластованию на удаленных расстояниях (относительная ошибка 0,5 %), однако вблизи воздухоподающих столов ошибка достигает 10 % и более. В работе [99] при помощи метода интегральных преобразований и использования специальных функций Матье получены общие формулы для расчета температур по напластованию и вкрест его.

Оригинальные методы расчета процессов тепломассопереноса в сети горных выработок разработаны Г.З. Файнбургом на основе развития диффузионно-сетевых методов расчета для вентиляционных сетей произвольной топологии [85,156]. Это позволило увеличить адекватность моделирования процессов тепло- и массопереноса в вентиляционных сетях с выработками большого сечения, в которых значительную роль играют процессы конвективного и диффузионного переноса.

Значимые результаты по уточнению расчетных формул для коэффициента нестационарного теплообмена получены С.Г. Гендлером [39]. Автором показано, что на коэффициент нестационарного теплообмена, помимо времени теплообмена и эффективности теплоотдачи, оказывают влияние геометрическая форма выработки, анизотропия теплофизических свойств окружающего породного массива, конфигурация расположения горных выработок относительно друг друга. Также в работе приведена методика вычисления коэффициента нестационарного теплообмена для выработок с различными знаками температур воздуха и массива. С целью упрощения расчета при теплообмене воздуха с промерзающим (или оттаивающим) горным массивом Ю.Д. Дядькиным введено понятие коэффициента интенсификации теплообмена при агрегатных

переходах влаги, величина которого равна отношению значений коэффициентов нестационарного теплообмена, вычисленных с учетом фазовых переходов и без них [53].

За рубежом в описываемый период времени исследования теплового режима шахт и рудников в основном развивались в направлении накопления, обработки и обобщения экспериментальных данных [191,193], а также построения упрощенных моделей теплообмена. Приближенные методы теплового расчета горных выработок разработали А. Houberechts [203], F. Hinsley [202], J. Lamberechts [209], G. Wiles [231], H. Dietterle [197].

Однако все рассмотренные эмпирические, эмпирико-аналитические и аналитические методы моделирования тепломассообмена в рудничной атмосфере характеризуются следующими основными недостатками:

- значительные упрощения при постановке или решении задач тепло- и массообмена;
- ограниченная применимость на различных временных интервалах и без возможности учета индивидуальных особенностей шахт и рудников; и
- невозможность расчета распределения термовлажностных параметров в сетевой постановке.

На сегодняшний день они пригодны лишь для проведения оценочных расчетов, большинство из которых использует полуэмпирический коэффициент нестационарного теплообмена, зависящий от множества факторов и требующий индивидуальных способов определения для условий различных рудников и шахт.

1.3.2. Численные методы

Современный этап развития методов прогноза теплового режима рудников и микроклиматических параметров атмосферы горных выработок неразрывно связан с совершенствованием численных методов решения и вычислительной техники. Его интенсивное развитие началось с 90-х годов XX века.

В лаборатории горной теплофизики ИГДС СО РАН была разработана модель процесса теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом для условий рудников криолитозоны. Для моделирования процессов переноса теплоты в горном массиве и рудничном воздухе используется следующая система уравнений [153,161,160]

$$\left(c(T_m) + L \cdot w \cdot \rho \cdot \delta(T_m - T_m^*) \right) \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\lambda \cdot R \cdot \frac{\partial T_m}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_m}{\partial x} \right),$$

$$c_B \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + v \frac{\partial T_a}{\partial x} \right) = \frac{2 \cdot \alpha}{R_1} (T_{ст} - T_B) + \frac{q}{\pi \cdot R_1^2},$$

где T_m — температура породного массива, °С;

$c(T_m)$ — произведение теплоемкости на плотность массива, зависящее от фазового состояния влаги в массиве, Дж·м³/К;

L — скрытая теплота фазовых переходов, Дж/кг;

w — весовая влажность пород, доли;

T_m^* — температура фазовых переходов, °С;

$\delta(T_m - T_m^*)$ — дельта-функция Дирака;

λ — коэффициент теплопроводности массива, Вт/(м·К);

T_a — температура рудничного воздуха, °С;

c_B — эффективная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

R_1 — радиус горной выработки, м;

Граничные условия задаются в начале и конце выработки, а также на ее внешнем радиусе, равном радиусу теплового влияния. Решение задачи осуществляется с помощью метода конечных разностей, при помощи явной численной схемы.

Следует отметить, что постановка задачи с граничными условиями первого рода на внешнем радиусе выработки физически не совсем корректна, поскольку в действительности радиус теплового влияния меняется с течением времени, и точность решения нестационарной задачи теплопроводности в значительной степени зависит от его правильного выбора.

Разработанная модель реализована в программно-вычислительном комплексе, написанном на алгоритмическом языке FORTRAN-77, который, помимо задач тепло-распределения, позволяет анализировать воздухораспределение в рудничной вентиляционной сети. Данная модель апробирована на практике и дает хорошие результаты при решении задач обеспечения необходимого теплового решения для устойчивости горных выработок в условиях рудников криолитозоны.

Альтернативная модель нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и горным массивом была разработана в лаборатории аэрологии и теплофизики ГИ УрО РАН для решения задач формирования и нормализации микроклимата в условиях калийных рудников [72]. Исходная постановка задачи осуществляется с помощью уравнений баланса теплоты в массиве и воздухе и сопряжении их на границе среды

«породный массив — воздух» при помощи граничных условий третьего рода. При этом «внешнее» граничное условие для температуры горного массива ставится в виде

$$T_m(r \rightarrow \infty) \rightarrow T_m^\infty,$$

где T_m^∞ — температура непо потревоженного массива.

Решение задачи осуществляется с помощью преобразования Лапласа по времени и получается в виде квадратур, вычисление которых аналитически в виде элементарных функций не представляется возможным. Поэтому конечное решение задачи осуществляется численно в специальном программном модуле. Стоит заметить, что в данной модели теплообмен моделируется корректно для произвольных временных интервалов.

Описанная модель теплообмена усовершенствована в работах [74,95] на предмет учета геотермического распределения температур непо потревоженного горного массива для моделирования процессов изменения температуры рудничного воздуха и породного массива на неглубоких участках воздухоподающих и вентиляционных стволов.

Схожая модель предложена О.И. Дударем, Е.С. Дударь и Н.Н. Мохиревым [49,48]. Решение задачи осуществляется с помощью интеграла Лайона и приближения о логарифмическом профиле скоростей и позволяет рассчитывать процессы тепломассопереноса в горизонтальных горных выработках калийных рудников.

Для условий угольных шахт Д.Ю. Палеевым и Ю.Ф. Шрагером разработана математическая модель для расчета нестационарных процессов воздухо-, тепло- и газораспределения в сети горных выработок [24]. Математическая модель базируется на совместном решении уравнений неразрывности, движения и энергии, записанных для парциальных плотностей компонент в каждой выработке. Уравнения связываются на сопряжении выработок на основе законов сохранения массы, энергии и концентрации примесей. Примечательно, что в разработанной математической модели температура стенок выработки является переменной, для ее расчета модель дополнена уравнением теплопроводности в массиве со следующими граничными условиями:

$$\frac{\partial T_m(x, r = 0, t)}{\partial r} = \alpha \cdot (T(x, t) - T_m(x, r = 0, t))$$

$$\frac{\partial T_m(x, r \rightarrow \infty, t)}{\partial r} = 0$$

где T_m — температура массива горных пород, °С;

T — температура рудничного воздуха, °С.

Расчет коэффициента теплоотдачи α в представленной модели осуществляется с учетом вынужденной и свободной конвекции газа в выработках по эмпирическим формулам, учитывающим наклон выработок. Разработанная математическая модель хоро-

шо применима для моделирования аварийных режимов проветривания с учетом влияния на воздухораспределение мощных источников тепловыделения, таких как подземные пожары, взрывы и вспышки газа. Модель реализована в программном комплексе «Вентиляция 2.0» и на сегодняшний день применяется при разработке противоаварийных мероприятий для угольных шахт [119].

Другие существующие методики, модели и программы расчета [79,67], позволяют рассчитывать теплообмен между рудничным воздухом и горным массивом в несопряженной постановке, дающей удовлетворительные результаты только для моделирования быстропротекающих аварийных режимов проветривания.

При моделировании тепловых процессов в мерзлых породных массивах рудников криолитозоны необходим учет теплоты фазового перехода. Исследованию процессов оттаивания и промерзания дисперсных горных пород посвящены работы Ю.Д. Дядькина [53], Э.Д. Ершова [57], Т.Н. Жесткова [58], Н.А. Цытович [166], Ю.А. Хохолова [153], А.С. Курилко [90,153].

При рассмотрении систем разработок с закладкой выработанного пространства важным является учет тепловыделений, сопровождающих процесс твердения связующего в закладочном массиве. Как показывают результаты натурных исследований, твердение закладочного массива может сопровождаться его нагревом в несколько десятков градусов. Исследованиям тепловых процессов в закладочных массивах, а также тепловым взаимодействиям закладочного и породного массивов посвящены работы С.Г. Гендлера, Ю.В. Шувалова [38,172], А.С. Курилко и Ю.А. Хохолова [152].

Среди зарубежных исследований данной тематики следует выделить работы К.Л. Gibson и М.Д. McPherson [200,23,212]. Однако предложенные ими модели являются лишь усовершенствованием предыдущих исследований, основанных на получении приближенных решений известными аналитическими методами. В современных зарубежных программно-вычислительных комплексах, таких как VUMA (разработка специалистов компании Bluhm Burton Engineering, ЮАР), CLIMSIM (разработка специалистов компании Mine Ventilation Services (SRK Consulting), США), для расчета теплораспределения используются приближенные формулы.

На основании большого числа экспериментальных исследований, выполненных в условиях глубоких рудников, установлено, что одним из основных факторов формирования теплового режима являются влагообменные процессы [75]. При этом они являются наиболее сложно детерминируемым фактором, так как характеризуются сложностью экспериментального определения и нестационарностью протекания, поэтому

моделирование их влияния на распределение температуры рудничного воздуха, особенно в сетевой постановке, является вопросом сложным и недостаточно исследованным. Исследования влияния фазовых переходов влаги на температуру воздуха посвящен ряд работ [84,114,35,146,215,207], однако на сегодняшний день отсутствуют математические модели, позволяющие на основании экспериментальных данных, полученных в ходе воздушно-депресссионных и температурно-влажностных съемок, выполнять расчет тепло- и воздухораспределения в сети горных выработок с учетом тепловыделений фазовых переходов влаги.

В целом современные методы математического моделирования тепломассообменных процессов в породных массивах и рудничной атмосфере можно разбить на две группы:

1. Классические численные методы решения задач теплопереноса в твердых и текучих средах, такие как метод конечных разностей, метод конечных объемов и элементов.
2. Численно-аналитические методы решения — когда частично задача решается с помощью аналитических методов, частично — с помощью численных.

Основным преимуществом методов первой группы является практически неограниченная сложность постановки задачи и всего необходимого сложного комплекса факторов. Основным недостатком — необходимость решать задачу на конечных геометрических областях, в то время как наиболее физичным приближением является неограниченный породный массив.

Основным преимуществом методов второй группы является возможность корректного учета отдельных особенностей, — таких как неограниченность породного массива. Недостатком — значительное ограничение возможностей усложнения исходной постановки задачи различными факторами, такими как наличие фазовых переходов в горном массиве, анизотропия свойств массива и т.д.

Помимо этого, существующие методы не учитывают важного фактора формирования теплового режима глубоких шахт и рудников — гидростатического сжатия/разрежения воздуха при его движении по вертикальным и наклонным горным выработкам. Поэтому требуется развитие численных методов моделирования термодинамических процессов, протекающих в рудничной атмосфере и породных массивах в условиях глубоких рудников.

1.4. Способы регулирования микроклиматических условий

Специфика регулирования теплового режима рудников зависит от целого ряда факторов, среди которых можно выделить климатические и географические условия района, горногеологические условия залегания полезного ископаемого, технологии ведения горных работ и применяемое горно-шахтное оборудование.

Способы регулирования теплового режима по критерию применения или неприменения технических средств изменения параметров воздуха традиционно делятся на две большие группы [8]:

1. горнотехнические (без использования средств охлаждения воздуха);
2. теплотехнические (с использованием средств охлаждения воздуха).

Горнотехнические способы технически и технологически являются наиболее простыми, не требующими значительных энергетических, капитальных и эксплуатационных затрат. Они находят широкое применение на практике, как самостоятельно в условиях переходного теплового режима от нерегулируемого к регулируемому, так и при использовании теплотехнических способов. Их практическая реализация осуществляется технологическими приемами (изменение вентиляционных режимов, конструктивных параметров выработок, технических характеристик отдельных элементов и др.) и теплофизическими, связанными с учетом геотермических и климатических условий месторождения и района, изменением интенсивности протекания процессов тепломассообмена в выработках.

К теплотехническим методам относят те, которые предполагают использование специальных средств и систем охлаждения рудничного воздуха или породного массива.

Теплотехнические способы технически наиболее совершенны, обеспечивают регулирование любых параметров в широком диапазоне условий, но требуют значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Они могут осуществляться путем свободного или вынужденного тепломассообмена, и таким образом различают соответственно безэнергетические и энергетические способы. Первые реализуются на базе природных или вторичных ресурсов теплоты и холода, вторые — с использованием трансформируемых внешних энергоресурсов.

Техническая реализация теплотехнических способов осуществляется с помощью средств и систем регулирования, представляющих собой инженерные конструкции, обеспечивающие направленное изменение термодинамических параметров рабочего тела или регулируемого объекта в заданных пределах.

При этом для их расчета и проектирования используются математические модели двух видов: моделирующие процессы в выработках с охлаждением воздуха и моделирующие работу собственно охлаждающих устройств и систем.

Альтернативная, более полная классификация систем регулирования теплового режима для условий криолитозоны с учетом регулирования термодинамического состояния массива горных пород предложена Ю.Д. Дядькиным [53], однако ее не имеет смысла рассматривать при решении задач снижения температуры воздуха в горных выработках глубоких рудников.

1.4.1. Горнотехнические способы регулирования теплового режима

Горнотехнические способы регулирования теплового режима направлены на уменьшение нагрева рудничного воздуха при его движении от поверхности до подземных рабочих зон за счет определенных изменений в технологии ведения горных работ, схем вентиляции, крепления горных выработок.

К горнотехническим методам регулирования теплового режима шахт относятся [8,46,176]:

- улучшение проветривания выемочных участков (применением рациональных схем вскрытия и вентиляции, увеличением расхода воздуха, обособленным проветриванием машинных камер и др.);
- уменьшение тепловыделения горного массива (теплоизоляцией стенок выработок);
- уменьшение тепловыделения от окислительных процессов (снижением запыленности стенок выработок, их специальными покрытиями, заменой деревянной крепи на другие виды её, орошением ископаемого в вагонетках и на конвейере специальными составами);
- снижение тепловыделения от местных источников теплоты (сокращением — времени нахождения ископаемого в выработке, ожуживанием конвейеров и заменой их на теплоизолированные вагонетки, переводом шахтного транспорта на вентиляционный горизонт и др.);
- уменьшение нагрева вентиляционной струи трубопроводами со сжатым воздухом и горячими средами (охлаждением трубопроводов или переносом их в вентиляционный ствол и выработки вентиляционного горизонта).

Горнотехнические методы экономичнее теплотехнических при рациональном их использовании. Их обоснование и разработка требуют проведения многовариантных

тепловых расчетов параметров воздуха и массива. Для этого, в большинстве случаев, используются методы расчёта, основанные на моделях, представленных в работах [176,46,8]. При моделировании таких горнотехнических методов, как теплоизоляция стенок выработок [179,56,151,7] и нанесение на них специальных антиокислительных покрытий [55,77], используются некоторые из моделей теплопереноса в неоднородных горных массивах. Такой является [81] двухслойная модель системы «теплоизоляция — массив», более строгая, чем модели [151,7], основанные на понятии о коэффициенте теплопередачи теплоизоляции (что справедливо только для стационарных температурных полей).

Среди современных исследований, посвященных разработке горнотехнических мероприятий, следует выделить работы В.А. Бойко [16,15,124]. В работах для условий угольных шахт Донбасса проанализированы возможные способы ускоренного растепления массива горных пород вокруг горных выработок, особенно в период их проходки.

Общим недостатком всех горнотехнических методов регулирования теплового режима является ограниченная эффективность, в значительной степени зависящая от геологических и горнотехнических особенностей отработки залежей.

В практике регулирования теплового режима горнотехнические методы применяются в так называемом переходном интервале глубин, предшествующем более жестким тепловым условиям, когда возникает необходимость применения теплотехнических способов.

1.4.2. Теплотехнические способы регулирования теплового режима

Теплотехнические способы регулирования теплового режима предполагают использование технически сложных аппаратов изменения термодинамических параметров воздуха, поэтому требуют больших капитальных и эксплуатационных затрат, наличия обслуживающего персонала [21]. Значительная капиталоемкость теплотехнических способов приводит к высоким требованиям к их расчету и проектированию [8,174], что требует развития методов математического моделирования процессов кондиционирования шахтного воздуха и работы различных охлаждающих устройств с целью оптимизации средств и систем регулирования шахтного микроклимата [163,164].

К охлаждающим устройствам относятся все технические средства регулирования температуры шахтного воздуха (кроме калориферов): поверхностные и подземные

холодильные машины, водо- и воздухоохладители, передвижные кондиционеры, теплообменники, воздухопроводы с холодным воздухом и др. [162,177,179].

Все воздухоохладительные установки для шахт и рудников в зависимости от расположения теплообменных аппаратов (испарителя и конденсатора) и мест выдачи охлажденного воздуха делятся на 5 групп [179]:

- установки для охлаждения рудничного воздуха на поверхности шахты;
- установки, охлаждающие рудничный воздух на горизонте при размещении холодильных машин на поверхности шахт;
- установки для охлаждения рудничного воздуха с холодильными машинами на глубоком горизонте при отводе теплоты конденсации на поверхность;
- установки для охлаждения рудничного воздуха с холодильными машинами на глубоком горизонте при подземном отводе теплоты конденсации;
- комбинированные установки.

Результаты исследований конвективного теплообмена влажного воздуха в охлаждающих устройствах [177] излагаются в работах Л.Д. Бермана, А.В. Болгарского, А.А. Гоголина, Н.М. Жаворонкова, Р.М. Ладыженского, Л.М. Кудряшова, А.В. Нестеренко и других. Ими получены критериальные зависимости для коэффициентов тепло- и массообмена, позволяющие осуществлять инженерный расчёт этих устройств. Исследования теплообменных и режимных параметров, используемых при моделировании шахтных охлаждающих устройств, проводились А.Н. Щербанём, О.А. Кремнёвым, В.Я. Журавленко, А.Н. Ягельским, Н.Н. Хохотвой, В.Н. Кефером, В.К. Черниченко, М.В. Юцкевичем, Ю.А. Цейтлиным, Б.И. Медведевым, Г.В. Авериним и другими исследователями. С 1970-х годов стали разрабатываться и испытываться локальные средства охлаждения: душирующие устройства, подающие охлаждённый воздух в призабойную часть тупиковой выработки или в участок лавы [162], охлаждаемые элементы забойного оборудования [186], средства индивидуальной противотепловой защиты горнорабочих [168,66].

Многие разработки получили практическое внедрение. В 1980 г. суммарная установленная мощность систем кондиционирования воздуха на угольных шахтах Донбасса была более 150 МВт, на рудниках ЮАР 350 МВт, ФРГ — 120 МВт [5]. На угольных шахтах Донбасса для кондиционирования применялась целая линейка холодильных машин отечественного производства завода ОАО «Холодмаш»: наземные холодильные машины ХТМФ-248-4000, ХТМФ-235М-2000 и 20ХТМФ-4000 и подземные холодильные машины КШ220-2-1, МФ220-1РШ, ШХТМ-1300, 2ТХМВ-2000-2,

21ШМКТ-820-2-0 [132], холодопроизводительность которых варьировалась от 314 кВт до 5100 кВт. Также находили применение шахтные передвижные кондиционеры холодопроизводительностью от 46 кВт до 134 кВт. Практическое внедрение систем кондиционирования воздуха сопровождалось созданием нормативно-правовой базы, регламентирующей устройства и безопасную эксплуатацию установок кондиционирования воздуха [154,132]. Однако внедрение систем кондиционирования воздуха на угольных шахтах значительно повышало себестоимость добычи и в 1990-х годах переход на новый, рыночный уклад работы предприятий привёл к стремительному сокращению применения систем кондиционирования воздуха и к 2004 году в эксплуатации находилась только одна подземная стационарная установка кондиционирования воздуха на шахте «Глубокая» шахтоуправления «Донбасс». Применение шахтных систем кондиционирования воздуха свелось к эпизодическим случаям при строительстве тупиковых горных выработок большой протяженности. Это хоть и привело к снижению себестоимости добычи угля, но резко ухудшило микроклиматические условия в горных выработках. Так, по данным [5], более чем на 50 шахтах Донбасса условия труда по тепловому фактору значительно превышают допустимые Правилами безопасности [115]. На ряде шахт с глубиной разработки 1100...1350 метров температура воздуха в действующих забоях достигает +35...+39 °С, а в отдельных тупиковых выработках доходит до +45 °С, что приводит к росту травматизма и заболеваемости горняков.

На рудниках ЮАР, ведущих работу на сверхглубоких залежах, для нормализации температуры воздуха используются преимущественно охлаждающие установки как поверхностного, так и подземного расположения. Согласно данным измерений температур рудничного воздуха в забоях поверхностные установки практически не эффективны в условиях сверхглубоких рудников, поэтому наиболее эффективным разработанным способом для рудников с глубиной более 2500 метров является технология «ice slurry» (бинарный лед), схема которой представлена на рисунке 1.3. Бинарный лед является гетерогенным хладоносителем и представляет собой смесь льда в виде частиц с размером не более 450 мкм и воды в пропорции 75/25, которая вырабатывается в вакуумном ледогенераторе и обогащается в ледоконцентраторе. Полученная смесь подается в трубопровод диаметром 500 мм, проложенный в стволе. Под действием силы тяжести смесь поступает в подземные резервуары, расположенные на различных уровнях, откуда подается потребителям холода. Отопленная вода собирается на горизонтах и насосами выдается на поверхность. Затем вода поступает в градирню, где охлаждается за счет контакта с атмосферным воздухом. После этого охлажденная вода поступает в холо-

дильную машину, в которой она охлаждается до температуры $+0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и далее снова поступает в ледогенератор.

Данная технологическая схема обладает следующими преимуществами:

- для производства бинарного льда подходит вода любого качества, в том числе шахтная с высокой степенью минерализации;
- доставка бинарного льда в шахту осуществляется за счет сил тяжести, без использования насосов и промежуточных теплообменников для снижения гидростатического давления;
- использование гетерогенного, двухфазного хладоносителя за счет теплоты фазового перехода плавления льда на 75 % снижает объем перекачиваемой массы по сравнению с водой, что позволяет экономить на мощности насосов и применять трубопроводы меньшего диаметра.

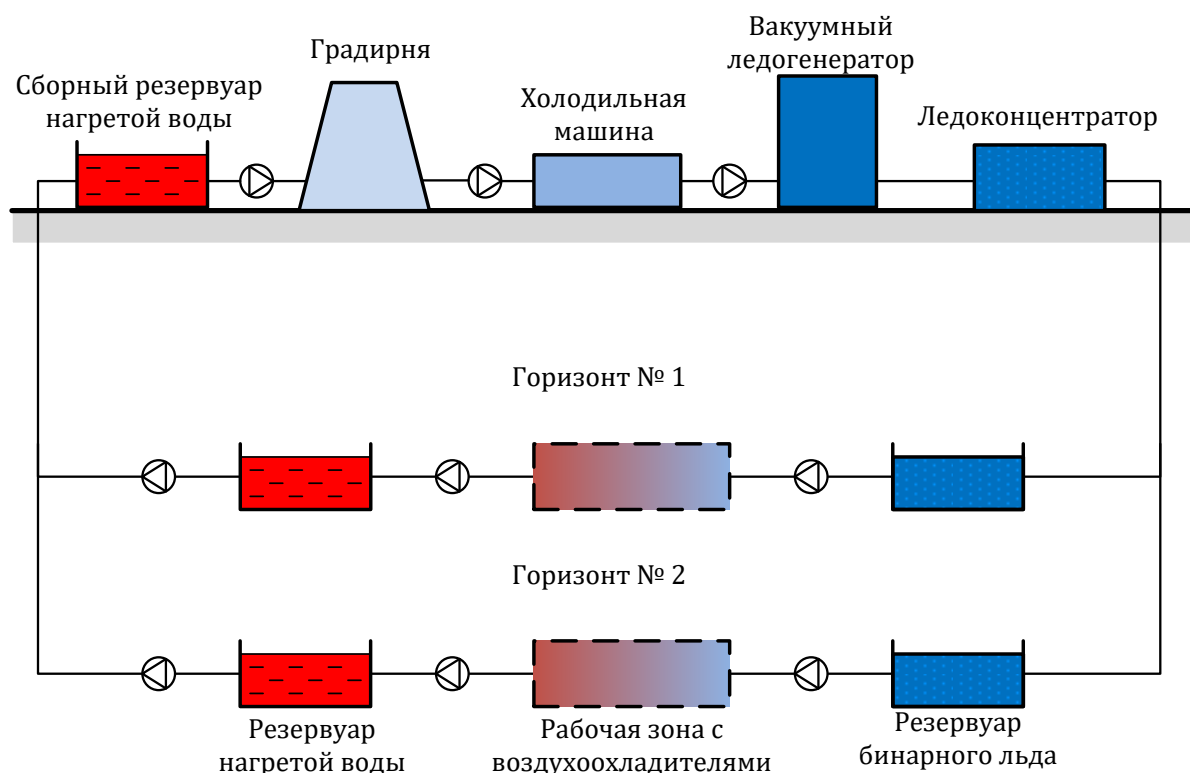


Рисунок 1.3 — Технология хладоснабжения шахты с применением бинарного льда

К недостаткам такой системы следует отнести значительный объем подземного и, особенно, поверхностного оборудования для генерации, транспортировки и хранения бинарного льда. Кроме того, ледогенераторы являются очень дорогостоящими и для работы требуют значительных электрических мощностей. Поэтому такие системы кондиционирования воздуха применяются только на крупных горнодобывающих компани-

ях ЮАР, ведущих добычу на глубинах свыше 2500 метров и имеющих высокую рентабельность добычи руды.

На глубоких шахтах Германии и Польши также имеется значительный опыт применения не только традиционных систем кондиционирования воздуха со стационарными и передвижными холодильными машинами подземного расположения, но и центральных систем охлаждения с поверхностным расположением холодильных машин.

Украинскими исследователями А.А. Мартыновым и А.К. Яковенко предложены системы локального охлаждения рудничного воздуха в горных выработках, в основном базирующиеся на использовании технических средств завода «Холодмаш» (кондиционер КПШ-300 и холодильная машина МРХВ-1) [105]. Предложенные ими технические решения разработаны с учетом специфики угольных шахт и предполагают узкую направленность, ограниченную охлаждением воздуха в длинных очистных забоях.

На постсоветском пространстве в настоящее время разработкой шахтных систем кондиционирования занимается компания ООО «НПО «АэроСфера».

За рубежом исследованием и разработкой систем кондиционирования воздуха в глубоких рудниках наиболее интенсивно занимается инжиниринговая компания Bluhm Burton Engineering (BBE), расположенная в ЮАР, и немецкие компании Warme-Austausch-Technik GmbH (WAT) и Herco Kuhltechnik GmbH.

Практический опыт рудников СССР, ЮАР, Германии, Индии, Бразилии и Канады показывает, что наибольшую эффективность в условиях глубоких рудников имеют подземные охлаждающие установки.

1.4.3. Ресурсосберегающие технологии регулирования теплового режима

При рассмотрении ресурсосберегающих решений в системах регулирования теплового режима можно выделить два больших направления:

1. Задействование так называемых первичных (природных) источников холода — тепловой емкости массива горных пород, сезонных параметров теплого и холодного периодов, запасов холода в криолитозоне и т.д.
2. Совершенствование технических средств и технологий теплотехнических способов, что во многом связано с развитием науки и техники в целом.

К первому направлению можно отнести разработки в области создания способов, направленных на снижение температуры воздуха и обеспечение требуемых микроклиматических параметров рудничного воздуха на основе использования первичных

(природных) и вторичных (техногенных) источников теплоты и холода. Особенно актуальным данный вопрос является в условиях шахт и рудников Севера, результаты исследований в данном направлении изложены в монографии Ю.В. Шувалова [172]. Основными природными источниками теплоты и холода следует считать атмосферный воздух и горные породы разрабатываемых горизонтов, а также запасы поверхностных и подземных вод, вторичными — исходящую струю рудничного воздуха, аккумулирующую в себе целый ряд ресурсов других источников. Вспомогательными источниками, имеющими частный характер, являются поверхностные и подземные воды, машины и механизмы, экзотермические реакции, солнечное излучение, породы гелиотермозоны.

Существенным недостатком предложенных способов является сезонность действия и невозможность обеспечения охлаждения воздуха или отвода низко потенциальной теплоты на глубоком горизонте в наиболее напряженный — летний период. Этот недостаток предлагается устранять разработкой способа аккумуляции холода на поверхности за счет использования атмосферного воздуха. Но, с одной стороны, технически обеспечить значительный запас холода крайне затруднительно, а с другой стороны, первичные и вторичные источники по своей сути являются низкопотенциальными, что осложняет их промышленное использование.

Также при рассмотрении способов, относящихся к первому направлению, можно выделить исследования, направленные на минимизацию сезонных температурных колебаний приконтурной части мерзлого горного массива для обеспечения устойчивости горных выработок. Эти исследования напрямую не решают задачу снижения температуры воздуха в рабочих зонах, но тем не менее имеют важное научно-техническое значение. Разработки в этом направлении представлены в работах Ю.Д. Дядькина, А.Ф. Галкина, Ю.В. Шувалова, [56,173], Ю.А. Хохолова, А.С. Курилко [153] и получили широкую реализацию при отработке ряда угольных и алмазных месторождений Якутии, рудниках Норильского никеля.

Ко второй группе технологий, обеспечивающих ресурсосбережение, можно отнести совершенствование существующих теплотехнических способов регулирования теплового режима. В эту группу входят как научно-методические разработки по проектированию оптимальных систем кондиционирования воздуха по критерию минимальных капитальных и эксплуатационных затрат при обеспечении требуемых микроклиматических параметров, так и технические разработки, позволяющие повысить эксплуатационные характеристики применяемых технологий кондиционирования.

К научно-методическим трудам, направленным на разработку оптимальных систем кондиционирования воздуха глубоких рудников, следует отнести цикл научно-исследовательских работ под руководством Цейтлина [163,164]. Однако выполненные в этом направлении исследования сводятся к решению задачи оптимизации размещения воздухоохладителей и определения их холодильной мощности вдоль одной нагретой горной выработки таким образом, чтобы обеспечить на всем ее протяжении требуемую температуру воздуха.

На сегодняшний день разработкой и внедрением систем кондиционирования воздуха в глубоких и сверхглубоких рудниках наиболее интенсивно занимается инженеринговая компания Bluhm Burton Engineering (BBE), расположенная в ЮАР. В частности, в современных работах исследователями [199,211] предлагается структурно-иерархическая концепция охлаждения и кондиционирования воздуха, представленная на рисунке 1.4.

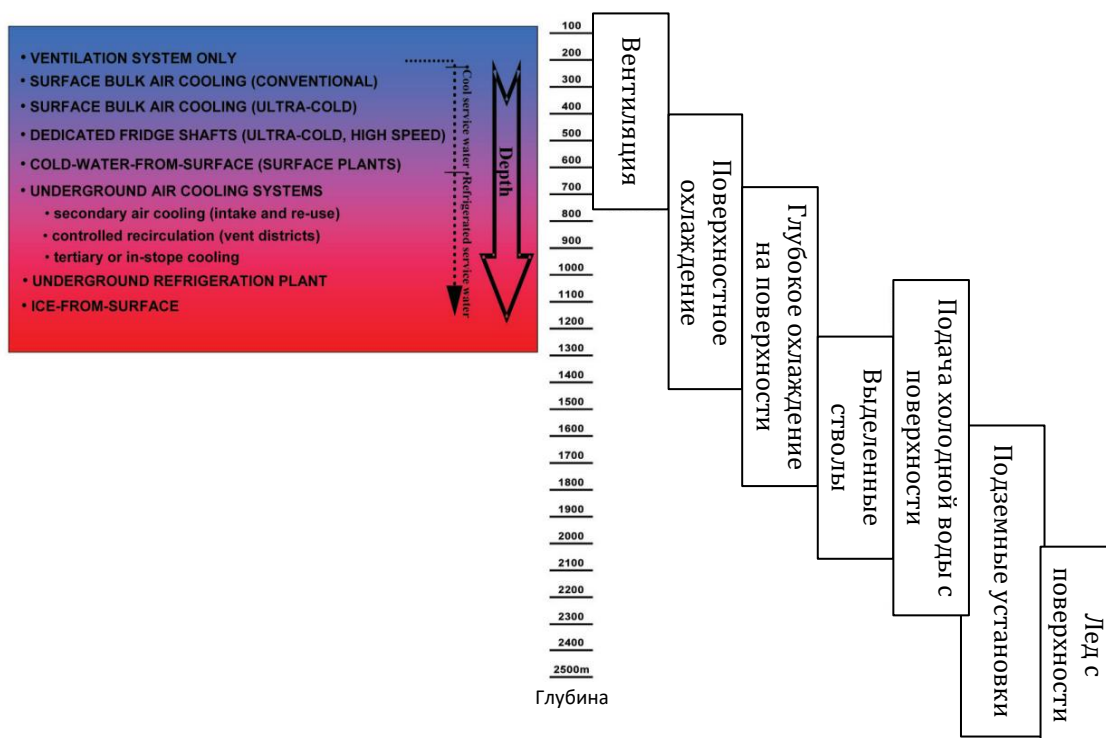


Рисунок 1.4 — Рекомендуемые способы нормализации микроклиматических условий в зависимости от глубины по данным компании BBE (ЮАР)

Анализ современной зарубежной литературы позволяет сделать вывод, что при выборе того или иного способа кондиционирования воздуха необходимо использовать следующий основной принцип — чем дальше при углублении горных работ можно отсрочить момент внедрения подземных систем кондиционирования, тем лучше. Объясняется это тем, что при использовании подземных систем кондиционирования воздуха

значительно возрастают капитальные затраты на отработку глубокозалегающих залежей.

Для реализации этого принципа важной составляющей является наличие обоснованной системы нормирования микроклиматических условий, исключающей избыточные требования к допустимой температуре, скорости движения и относительной влажности воздуха. Например, основная идея регулирования теплового режима на горных предприятиях Германии заключается в том, что при недостаточности средств вентиляции для обеспечения требуемых микроклиматических условий вводятся ограничения на время работы — либо сокращается длительность рабочей смены, либо организуются перерывы (в теории безопасности жизнедеятельности данные мероприятия относятся к защите «временем» персонала от вредного фактора). При дальнейшем ухудшении микроклиматических условий используются дорогостоящие теплотехнические мероприятия регулирования теплового режима, предусматривающие использование технических средств охлаждения воздуха.

На шахтах Германии, Польши и Китая широко распространённым принципом построения систем охлаждения с поверхностным размещением холодильных станций является применение системы P.E.S. (pressure exchange system) или так называемых трёхкамерных трубчатых питателей, которые заменяют теплообменники высокого/низкого давления, устанавливаемые под землей [5,216] (см. рисунок 1.5).

Суть работы системы заключается в синхронной работе системы впускных-выпускных клапанов, которые осуществляют повышение и понижение давления воды в трубопроводной системе питателей в зависимости от того, с каким контуром они соединяются или разъединяются. Работа системы клапанов состоит в поочередном циклическом заполнении трубчатых питателей, являющихся своего рода сборниками хладоносителя, нагретой воды, приходящей от подземных воздухоохладителей, и последующем вытеснении этой нагретой воды во внешний контур с заполнением питателей уже холодной водой, подаваемой с поверхности. Поскольку подобная система лишена как такового процесса теплообмена между двумя средами, ее работа лишена традиционных недостатков теплообменников высокого/низкого давления — повышение температуры воды при переходе из одного контура в другой не превышает 2 °С.

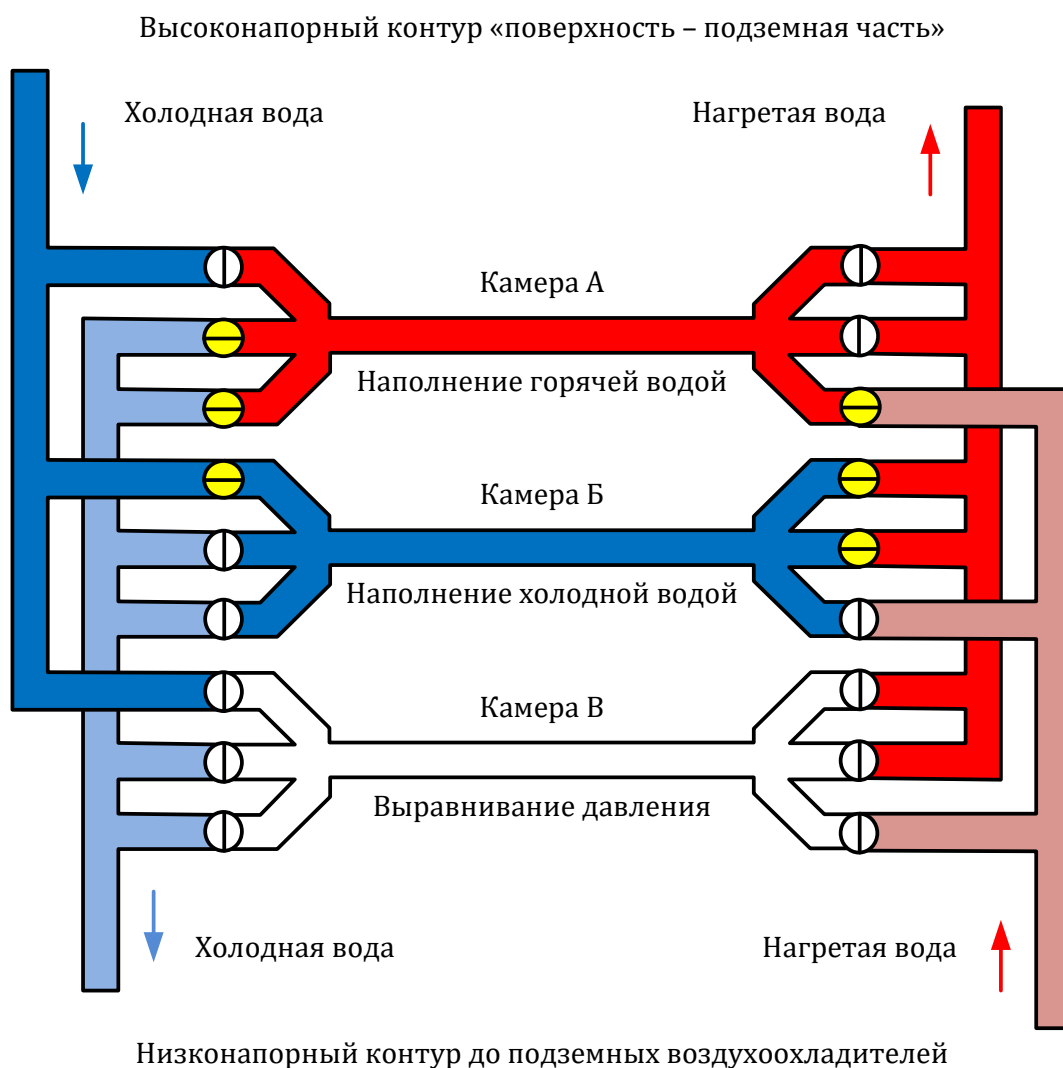


Рисунок 1.5 — Схематичное изображение системы обмена давлениями P.E.S.

В последнее десятилетие в системах кондиционирования воздуха для подачи хладоносителя по сети горных выработок успешно применяются трубы, изготовленные из полимерных материалов. Внутренняя шероховатость таких труб ниже, чем стальных, что приводит к снижению их гидравлического сопротивления и, следовательно, снижению капитальных и эксплуатационных затрат.

Еще одним направлением развития ресурсосберегающих технологий кондиционирования воздуха является применение на угольных шахтах абсорбционных холодильных машин в составе поверхностных холодильных станций для охлаждения воздуха в шахтах. Это позволяет реализовать так называемый принцип тригенерации, когда из сопутствующего добыче угля метана производится выработка электроэнергии, тепловой энергии и холода. В результате обеспечивается существенная экономия топливно-энергетических ресурсов.

Ряд исследований посвящен разработке ресурсосберегающих систем охлаждения рудничного воздуха за счет его увлажнения или использования сжатого воздуха. В частности, в работах А.А. Лапшина предлагаются способы использования форсуночного охлаждения воздуха с использованием шахтных вод и разработаны математические модели для расчета данного способа [92]. К недостаткам предлагаемого способа следует отнести низкий коэффициент полезного действия такого устройства и небольшие величины вырабатываемой холодильной мощности.

Для повышения эффективности охлаждения технологического оборудования предлагается способ раздельного использования хладоносителя для охлаждения воздуха и нагреваемых элементов оборудования [2]. Особую актуальность данная тема имеет для случая длинных очистных забоев с мощными энергопоездами, расположенными в подготовительных выработках с маленькими расходами подачи воздуха. Но для случая длинных очистных забоев предлагаемая разработка не может быть применена по следующим причинам:

- невозможность прямой подачи хладоносителя для охлаждения забойного оборудования ввиду наличия собственной системы охлаждения;
- использование вентиляционных трубопроводов (воздуховодов) в схеме проветривания выработки, в то время как проветривание длинных очистных забоев осуществляется за счет общешахтной депрессии;
- применяется последовательная подача хладагента для охлаждения воздуха и оборудования, что не позволяет производить независимое (раздельное) охлаждение воздуха и технологических сред оборудования;

Крайне важным направлением совершенствования ресурсосберегающих характеристик систем кондиционирования воздуха является совершенствование теплообменных аппаратов [5]. Традиционная конструкция теплообменных аппаратов имеет прямоугольную форму, теплообменная поверхность которых состоит из поверхностей отдельных трубок. Воздушный поток вентилятора, проходящий через воздухоохладитель, распределяется неравномерно по сечению и вблизи углов формируются зоны пониженных скоростей, приводящие к снижению интенсивности теплообмена между воздухом и теплоносителем. Даже в случае вертикально установленных теплообменных трубок или пластин, позволяющих распределить воздушный поток, удельный коэффициент теплопередачи таких традиционных теплообменных аппаратов не превышает $90 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. На сегодняшний день немецкой компанией WAT в результате множества экс-

периментов выполнено совершенствование конструкции теплообменных аппаратов, включающее следующие технические решения:

- применение цилиндрической формы корпусов теплообменных аппаратов;
- использование в качестве теплообменного пакета двойных спиралевидных теплообменных трубок, расположенных вдоль движения воздушного потока;
- противоточная подача воздуха и хладоносителя.

Благодаря этим техническим решениям современные теплообменные аппараты обеспечивают удельные коэффициенты теплопередачи до $120 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$.

В то же время, рассмотренный опыт разработки ресурсосберегающих решений не касается глубоких рудников нашей страны, имеющих две особенности. Первая — ведение горных работ на относительно небольших глубинах по сравнению с теми, для которых рассмотренные ресурсосберегающие решения разработаны. В ряде случаев это переходные интервалы глубин около 1 километра с температурой горных пород не более $+26 \text{ °C}$. В таких условиях целесообразна разработка ресурсосберегающих местных систем кондиционирования, позволяющих локально обеспечить требуемые микроклиматические параметры, а применение центральных систем кондиционирования не целесообразно. Вторая особенность — горные предприятия зачастую расположены в Северных регионах в районах вечной мерзлоты, что влечет за собой необходимость строительства крайне капиталоемких надшахтных комплексов и поверхностных систем. В таких условиях оказывается, что применение подземных систем кондиционирования воздуха является более оптимальным техническим решением как с точки зрения капитальных, так и с точки зрения эксплуатационных затрат.

Таким образом, рассмотрение существующих способов регулирования теплового режима, в том числе с использованием ресурсосберегающих технологий, и современных условий ведения горных работ на больших глубинах, показывает необходимость развития теории ресурсосберегающих систем управления тепловым режимом глубоких рудников нашей страны, ведущих добычу в интервале глубин от 1000 до 2000 метров.

1.5. Цель и задачи исследования

На основании проведенного анализа проблемы и существующих способов ее решения сформулирована следующая цель исследования — разработка теоретических и технологических основ построения ресурсосберегающих систем управления термодинамическими параметрами рудничной атмосферы, обеспечивающих безопасные

условия труда в подземных рабочих зонах при ведении горных работ в условиях влияния мощных техногенных источников тепловыделения и высокой температуры породного массива.

Для достижения цели требуется решение следующего ряда задач:

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

2. ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ

На начальном этапе работы требуется выполнение детальных экспериментальных и теоретических исследований теплового режима современных шахт и рудников, являющихся объектами исследования.

На основе полученных экспериментальных данных в этой главе работы строится теория моделирования процессов формирования теплового режима глубоких рудников с учетом их индивидуальных особенностей, прикладной аспект которой заключается в возможности расчета микроклиматических параметров воздуха в подземных рабочих зонах и дальнейшей разработке мероприятий по их нормализации.

2.1. Экспериментальные исследования теплового режима глубоких рудников

Экспериментальные исследования особенностей формирования теплового режима выполнены в период с 2011 года по 2017 год на следующих глубоких рудниках:

- медно-никелевые рудники Талнахского и Октябрьского месторождений в Норильском промышленном районе, добывающие металлические руды с применением камерных и слоевых систем разработок с полной закладкой выработанного пространства;
- калийные рудники Старобинского месторождения в Республике Беларусь, ведущие добычу калийных солей с применением столбовых систем разработки с длинными очистными забоями и полным обрушением выработанного пространства.

Выполнение исследований на глубоких рудниках различных типов позволяет учесть максимально широкий спектр факторов и закономерностей формирования микроклиматических условий при применении различных схем вскрытия, подготовки и систем разработки.

Экспериментальные исследования включали измерение динамики изменения температуры и относительной влажности воздуха при его движении по горным выработкам от дневной поверхности до вентиляционных стволов через подземные рабочие зоны. При этом измерения производились как в теплый, так и в холодный периоды времени года. Результаты измерений представлялись в виде термограмм с выполнением их анализа с выделением основных участков и факторов формирования теплового режима горных выработок. После этого выполнялось количественное исследование каждого из факторов в отдельности.

2.1.1. Медно-никелевые рудники Норильского промышленного района

Экспериментальные исследования теплового режима выполнены на глубоком руднике «Таймырский» и шахте «Скалистая» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» (глубина ведения горных работ до 1800 метров). Вскрытие рудников осуществлено вертикальными стволами, проветривание осуществляется по фланговой схеме. На рудниках применяется слоевая система разработки с полной закладкой выработанного пространства. Добыча руды ведется буровзрывным способом, для погрузки и доставки руды используется мощная самоходная техника с двигателями внутреннего сгорания, откатка руды производится электровозами.

В условиях рудника «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» проведены экспериментальные исследования распределения температуры и влажности воздуха в стволах, главных воздухоподающих и вентиляционных горных выработках, а также в подготовительных и нарезных выработках в пределах горизонтов ведения очистных работ.

На рисунке 2.1 приведены графики экспериментально измеренного распределения температур в холодный и теплый периоды года по тракту движения воздушной струи от поверхности через участки ведения горных работ до вентиляционного ствола.

Аналогичные исследования проведены для шахты «Скалистая» рудника «Комсомольский». На рисунке 2.2 представлены графики экспериментально измеренного распределения температур в теплый период года по тракту движения воздуха.

Полученные термограммы позволяют сделать вывод о характере изменения микроклиматических параметров воздуха при движении от дневной поверхности до подземных рабочих зон для условий глубоких рудников Норильского промышленного района.

Первоначальный участок термограммы, связанный с движением воздуха вниз по воздухоподающему стволу, характеризуется значительным разогревом воздуха из-за его гидростатического сжатия. При этом температуры воздуха на данном участке преимущественно зависят от начальной температуры воздуха, определяемой в теплый период года температурой атмосферного воздуха, а в холодный — температурой нагрева воздуха в системе воздухоподготовки ствола.

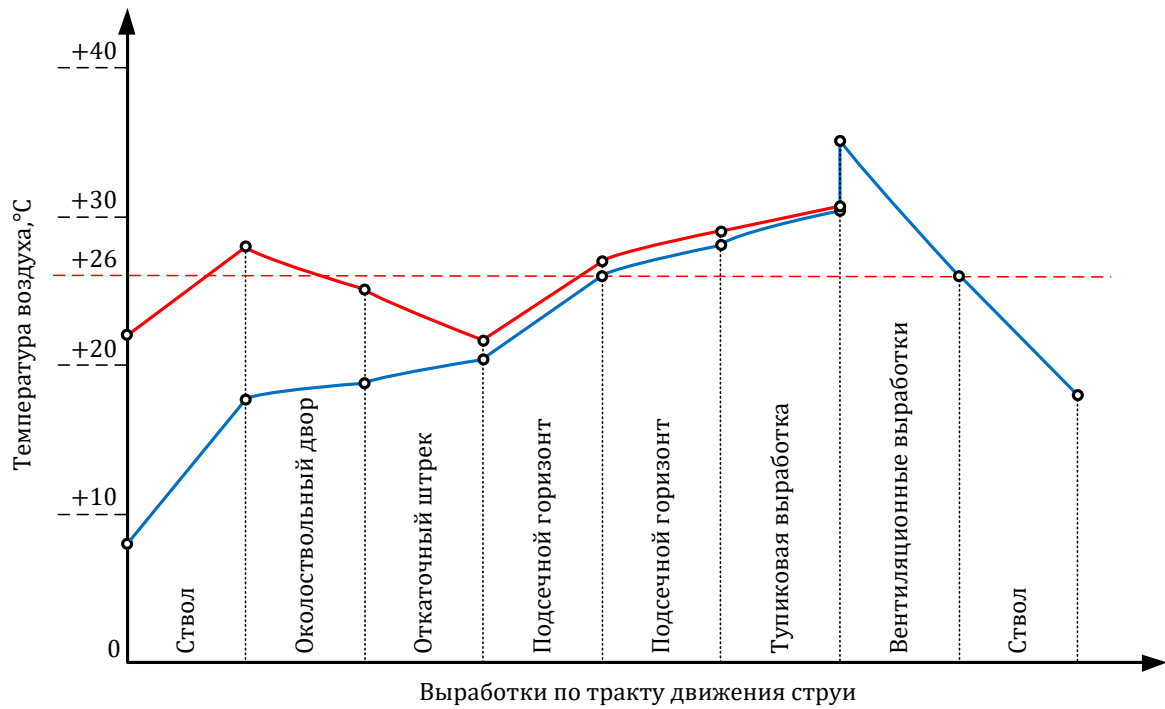


Рисунок 2.1 — Распределение температуры воздуха в холодный (синий график) и теплый (красный график) периоды года по тракту движения воздуха в руднике «Таймырский» (глубина ведения горных работ 1350 метров)

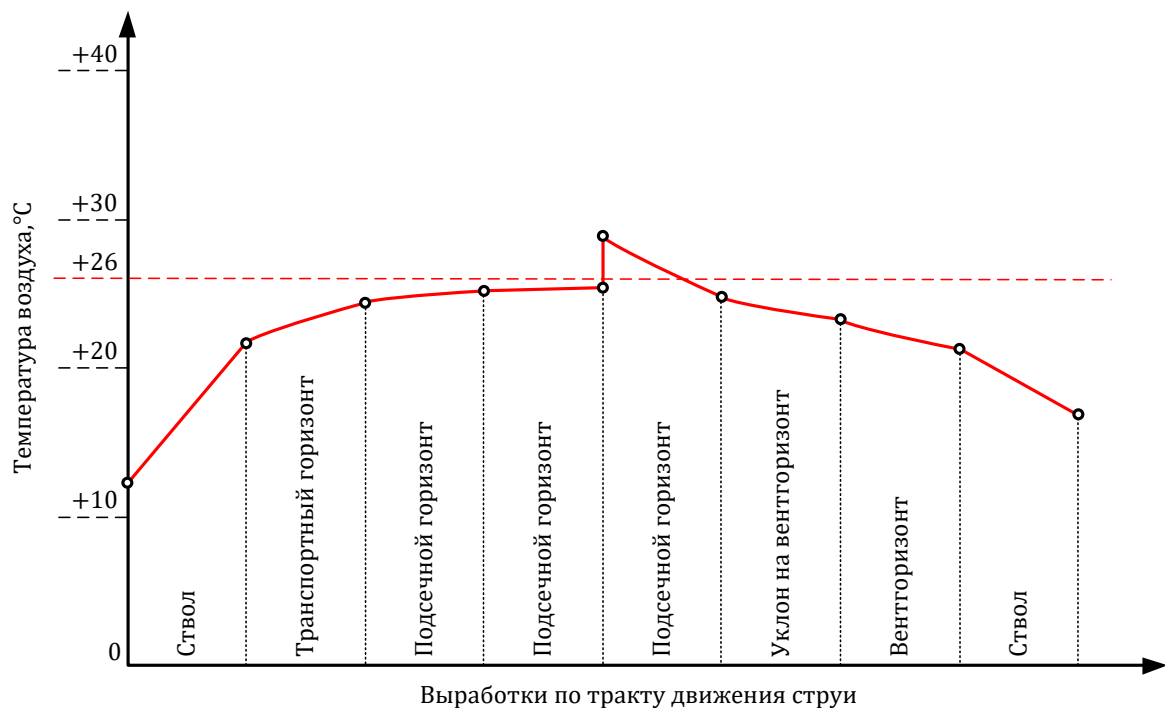


Рисунок 2.2 — Распределение температуры воздуха по тракту его движения в шахте «Скалистая» (глубина ведения горных работ 920 метров)

При дальнейшем движении воздуха по главным воздухоподающим выработкам до горизонтов ведения очистных работ наблюдается асимптотическое «выполаживание» графика температуры воздуха, связанное с теплообменом между воздухом и окружающим массивом горных пород. При этом асимптота, к которой стремится график температуры воздуха, зависит от температуры непо потревоженного массива горных пород на данной глубине, интенсивности протекания теплообмена между воздухом и горными породами и временем проветривания выработки. Согласно экспериментальным наблюдениям, в теплый и холодный периоды года изменение температуры воздуха в горных выработках на удалении 1500 метров составляет не более 2 °С. Таким образом, колебания температуры воздуха, подаваемой на проветривание рудника, практически не влияют на температуру воздуха, поступающего на проветривание горизонтов ведения очистных работ.

В пределах горизонтов ведения очистных работ отмечается зона резкого возрастания температуры воздуха и ухудшения микроклиматических условий непосредственно в рабочих зонах. Это объясняется значительным распараллеливанием воздушных потоков по отдельным подземным рабочим зонам и наличием следующих мощных источников тепловыделения: горных машин с двигателями внутреннего сгорания, твердеющих закладочных массивов и протяженных тупиковых горных выработок, находящихся в проходке.

Исследованиям тепловыделений от горных машин и твердеющих закладочных массивов посвящен отдельный раздел 2.2.

Отдельного рассмотрения требуют и протяженные тупиковые горные выработки, которые встречаются как при отработке отдельных слоев рудного тела, так и при проведении капитальных и подготовительно-нарезных работ. В ходе экспериментальных наблюдений установлено, что в тупиковых горных выработках протяженностью более 50 метров наблюдаются наиболее неблагоприятные микроклиматические условия — температура воздуха в них достигает +40 °С. Это связано со специфическим совместным действием следующих факторов формирования теплового режима:

- продолжительное время теплообмена между исходящим из забоя воздухом и породным или закладочным массивом (из-за протяженности горных выработок и относительно низкого расхода воздуха по ним);
- высокая интенсивность теплообменных процессов из-за отсутствия, либо малой величины тепловыравнивающего слоя пород свежееобнаженного массива горных пород;

- взаимодействие с не растеплённым затвердевшим закладочным массивом (для очистных горных выработок);
- интенсивный характер ведения горных работ, наличие тепловыделений приводов буровых и погрузочно-доставочных машин непосредственно в призабойной зоне.

Фактически это приводит к тому, что тупиковые забои являются не только участками с наиболее неблагоприятными микроклиматическими условиями, но и локальными источниками значительного приращения теплосодержания рудничной атмосферы.

На рисунке 2.3 приведены термограммы распределения температуры в тупиковых горных выработках в руднике «Таймырский» на глубине ведения горных работ 1600 метров. На термограмме наглядно видно резкое локальное возрастание температуры воздуха при подаче его в забой, где наблюдаются наиболее неблагоприятные микроклиматические условия.

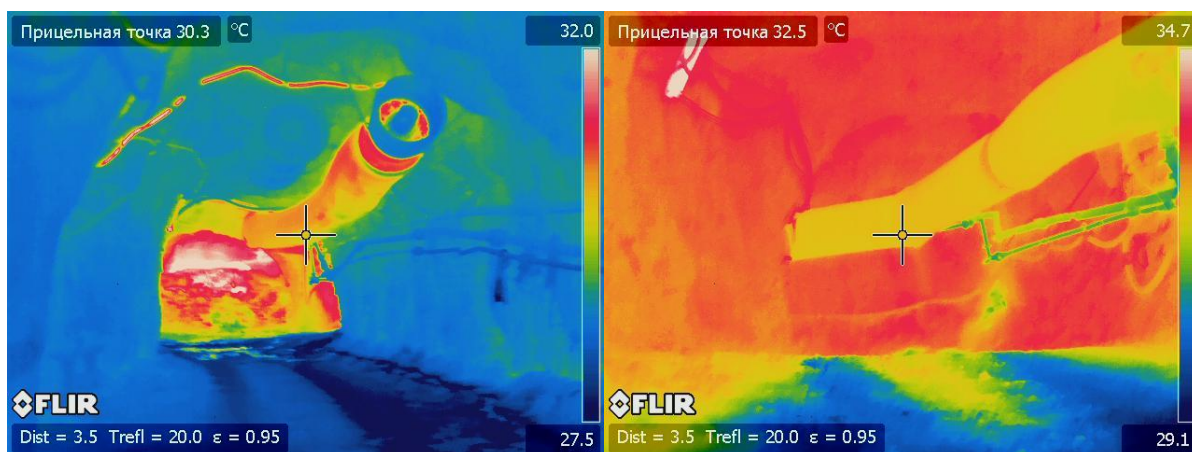


Рисунок 2.3 — Термограммы распределения температуры в тупиковой горной выработке

В таблице 2.1 приведены результаты экспериментальных измерений тепловыделений тупиковых забоев, выполненные в условиях рудника «Таймырский».

Таблица 2.1 — Результаты исследования тепловыделений тупиковых забоев

Тип тупиковой выработки	Расход, м ³ /с	Перепад температур, °С	Суммарное тепловыделение выработки, кВт
Проходческая	8,1	9,1	88,8
Очистная	11,7	1,7	19,9
Очистная	6,2	1,8	13,4
Разведочная	5,9	1,6	11,4

Тип тупиковой выработки	Расход, м ³ /с	Перепад температур, °С	Суммарное тепловыделение выработки, кВт
Очистная	10,2	0,8	9,8

В последующих разделах главы выполнены более детальные исследования отдельных факторов, формирующих тепловой режим на различных участках ведения горных работ.

2.1.2. Калийные рудники Старобинского месторождения калийных солей

Значительный объем экспериментальных исследований теплового режима выполнен на калийных рудниках Старобинского месторождения калийных солей (Республика Беларусь). На сегодняшний день глубина ведения горных работ на II и III калийных горизонтах рудников 3 РУ и 4 РУ ОАО «Беларуськалий» достигает 850 метров, где температура горных пород равна +24 °С. Вскрытие рудников осуществляется по центральной схеме, применяется центральная схема проветривания. Добыча руды ведется комбайновым способом преимущественно длинными очистными забоями с применением столбовой системы разработки, для транспортирования руды используется конвейерный транспорт.

Наиболее неблагоприятные микроклиматические условия в длинных очистных забоях зафиксированы при отработке запасов восточного направления горизонта -440 рудника 4 РУ. При этом пластовая залежь имеет моноклиналиное залегание с падением на северо-восток под углом от 3 до 5,2 градусов. При отработке запасов панели № 2 обратным порядком на начальной стадии глубина горных работ достигала 830 метров. Удаленность очистных забоев от околоствольных дворов на момент проведения измерения составляла более 12 километров.

Экспериментальные исследования распределения микроклиматических параметров воздуха в горных выработках включали измерения расходов, температур и относительных влажностей воздуха по тракту его движения от дневной поверхности до подземных рабочих зон и далее, по вентиляционным выработкам до ствола и выдачи на поверхность.

На рисунке 2.4 и 2.5 представлены результаты экспериментального определения микроклиматических параметров воздуха в выработках лав 2С-2 и 2С-3 в ремонтном и добычном режимах.

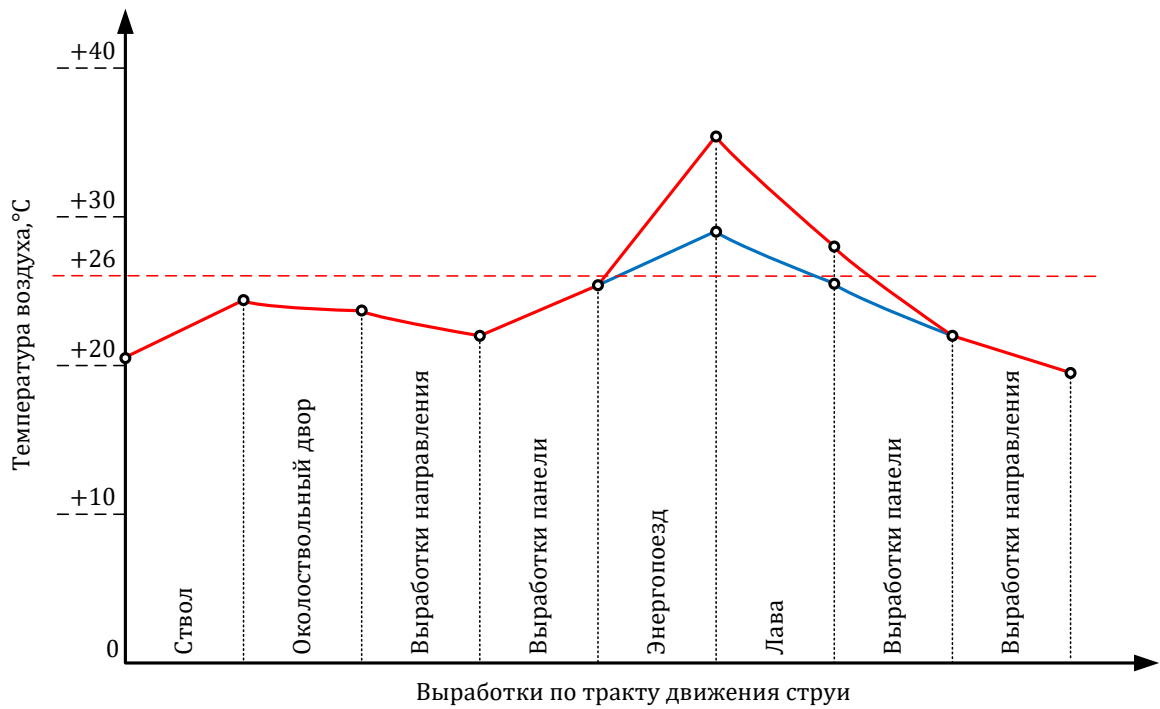


Рисунок 2.4 — Распределение микроклиматических параметров воздуха в лаве 2С-2 в добычном (красный график) и ремонтном (синий график) режимах работы

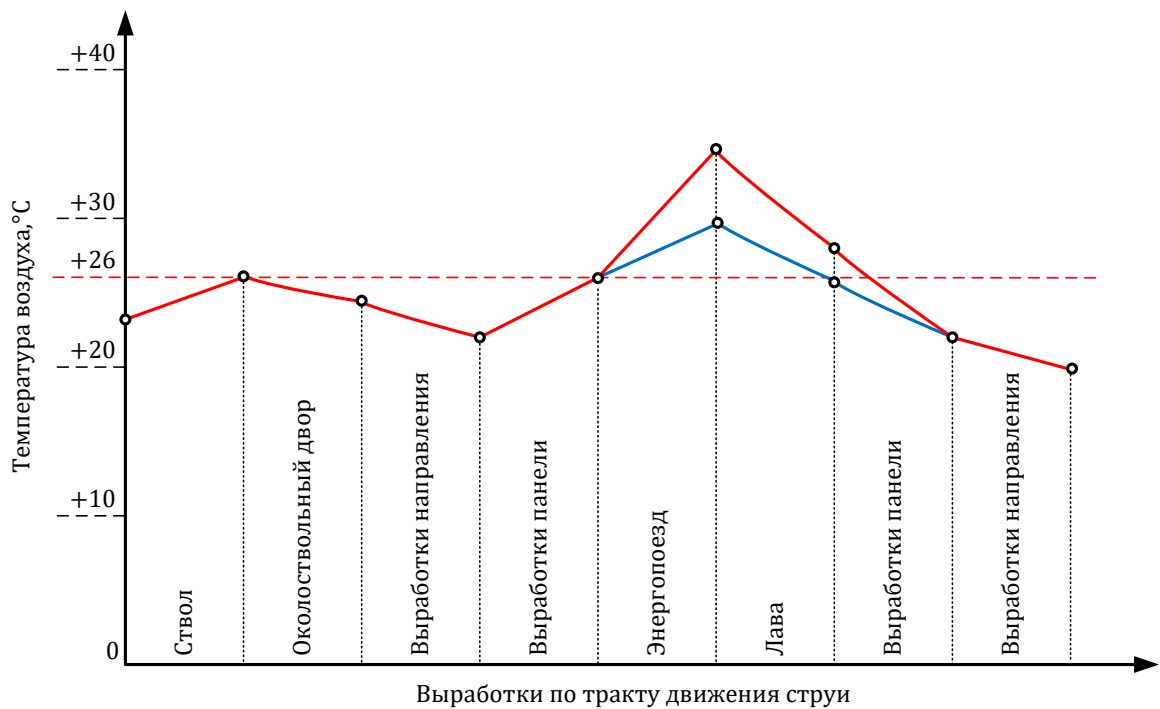


Рисунок 2.5 — Распределение микроклиматических параметров воздуха в лаве 2С-3 в добычном режиме (красный график) и ремонтном (синий график) режимах работы

Измерения производились в двух режимах работы лавы — добычном и ремонтном. Добычным режимом работы характеризуется работающим комбайновым комплексом и конвейерными линиями, что приводит к значительным тепловыделениям в подготовительных и очистных горных выработках. В ремонтном режиме работы лавы комбайн не работает.

В целом установлен следующий характер изменения микроклиматических параметров воздуха. Начальные параметры воздуха, подаваемого в ствол, определяются климатическими условиями на поверхности и работой систем воздухоподготовки. При движении по воздухоподающим стволам воздух нагревается из-за гидростатического сжатия. Далее при движении по выработкам околоствольного двора и главным воздухоподающим выработкам воздух в теплый период года охлаждается, а в зимний период нагревается до температуры нетронутого породного массива. В теплый период года охлаждение воздуха также сопровождается конденсацией излишней влаги, что приводит к снижению влагосодержания и стабилизации относительной влажности воздуха вблизи критических значений, равных упругости водяных паров над поверхностью насыщенных рассолов соответствующего минерального состава. В холодное время года тепло-массообменные процессы протекают в обратном порядке. Процесс выравнивания температуры воздуха до температуры нетронутого массива горных пород происходит на протяжении 2500...3000 м от воздухоподающих стволов. На всем остальном протяжении горных выработок микроклиматические условия остаются практически постоянными, и в дальнейшем существенное ухудшение условий происходит уже на участках ведения очистных работ в силу значительного выделения теплоты из-за работы энергоемкого электрооборудования (добычные комбайны, конвейерные линии, трансформаторы и т.д.). Наиболее неблагоприятные микроклиматические условия наблюдаются на сопряжении лавы с воздухоподающими выработками.

Участком, значительно влияющим на микроклиматические параметры воздуха, является энергопоезд — комплекс оборудования, расположенный во вспомогательном штреке непосредственно перед сопряжением с лавой. Помимо большого числа электрооборудования на энергопоезде размещается утилизатор тепловыделений системы охлаждения двигателей комбайна. Утилизатор представляет собой рекуперативный теплообменный аппарат, охлаждающий нагретую эмульсию, отводящую теплоту от поверхностей двигателей в атмосферу горной выработки. Для этого на энергопоезде дополнительно установлен вентилятор для поддержания расхода воздуха через теплообменный аппарат.

Далее при движении воздуха по лаве и далее по вентиляционным выработкам в силу отсутствия техногенных источников тепловыделения происходит теплообмен воздуха с массивом горных пород и температура воздуха через 1000...1500 метров становится снова равной температуре нетронутого массива горных пород.

2.1.3. Закономерности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить общие закономерности формирования микроклиматических условий в глубоких рудниках различных типов. Суть этих закономерностей следующая. Начальные параметры воздуха, подаваемого на проветривание, определяются климатическими условиями региона, зависят от его географического расположения, времени года и суток. При наличии системы воздухоподготовки на поверхности параметры воздуха претерпевают изменения и именно они определяют параметры воздуха на начальном участке ствола вблизи устья. В дальнейшем при опускании воздуха по стволу происходит его заметный нагрев из-за гидростатического сжатия с градиентом $0,00667...0,00769$ °С/м, который варьируется в зависимости от интенсивности фазовых переходов влаги, что может приводить даже к снижению градиента до $0,00455$ °С/м. Также установлен факт практически линейного графика изменения температуры воздуха, который очень слабо коррелирует с геотермическим распределением температуры горных пород. Таким образом, основными факторами, определяющими микроклиматические параметры воздуха в стволах, являются начальные параметры воздуха, гидростатическое сжатие/расширение воздуха и фазовые переходы атмосферной влаги. При дальнейшем движении воздуха по главным воздухоподающим выработкам воздух в процессе теплообмена с окружающими горными породами принимает температуру нетронутого массива горных пород, зависящую от геотермии участка. Расстояние, пройдя которое воздух принимает температуру пород, зависит от начальной разницы температур воздуха и нетронутого массива горных пород, скорости движения воздуха и поверхности теплообмена. Как правило, на практике это расстояние не превышает 3 километров. Непосредственно в рабочих зонах количество подаваемого воздуха снижается из-за его распределения по большому количеству горных выработок, а интенсивность тепловыделения от техногенных источников растёт — именно в местах ведения горных работ сосредоточено наибольшее количество горных машин и механизмов. Таким образом, большой объем тепловыделений приходится на меньший объем воздуха, ассимилирующий их. Это приводит к рез-

кому росту температуры воздуха непосредственно в очистных и проводимых горных выработках. Далее, при движении по вентиляционным выработкам температура воздуха вновь снижается и приближается к температуре окружающего породного массива. Описанная закономерность формирования микроклиматических параметров воздуха в горных выработках глубоких рудников проиллюстрирована на рисунке 2.6.

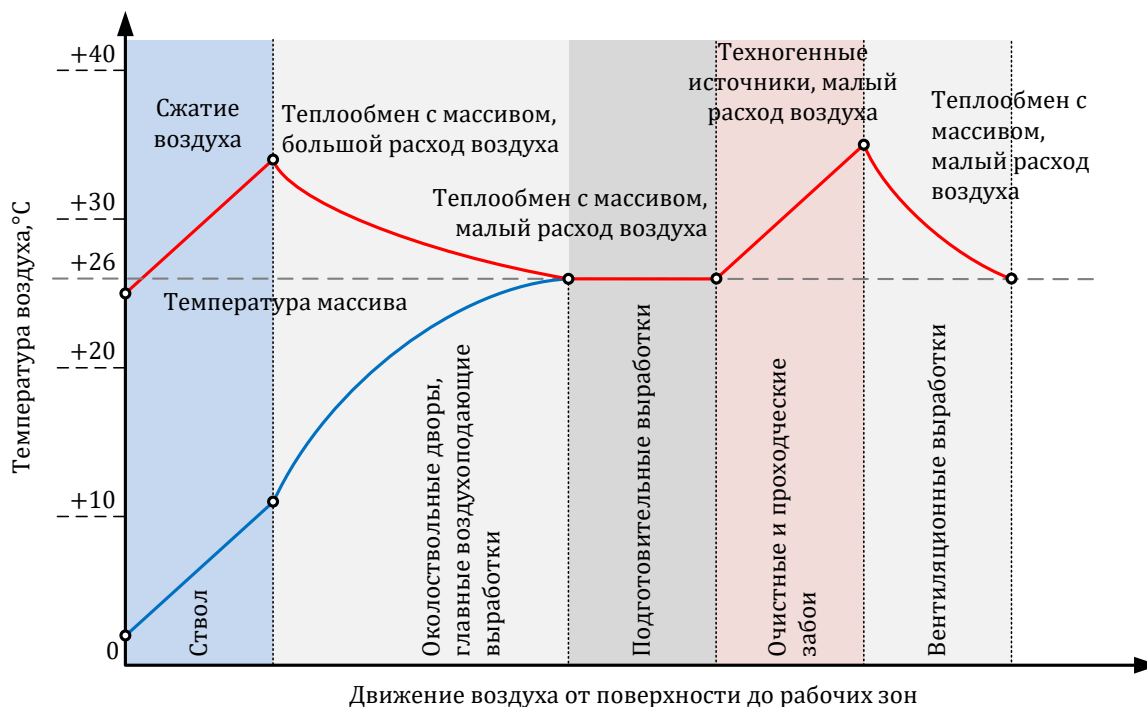


Рисунок 2.6 — Схематичное изображение закономерности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников

Установленная на основании экспериментальных измерений закономерность формирования микроклиматических условий позволяет дифференцировать горные выработки глубоких рудников по факторам формирования теплового режима, а также выделить важнейшие физические процессы, которые необходимо исследовать и разработать для них математические модели расчета.

В частности, самое сильное влияние на микроклиматические параметры воздуха в очистных и проходческих забоях, а это основные рабочие зоны с постоянным пребыванием людей, оказывают техногенные источники тепловыделения, к которым относятся горные машины с двигателями внутреннего сгорания и электроприводами. Их теоретическому и экспериментальному изучению посвящен раздел 2.2.

Начальная температура и относительная влажность воздуха, с которыми он поступает на проветривание рабочих зон, определяются процессами гидростатического сжатия/расширения воздуха при его движении по стволам, а также тепло- и массооб-

менными процессами, протекающими в рудничной атмосфере и окружающем породном массиве. Их исследованию посвящен раздел 2.3.

2.2. Исследование и моделирование техногенных источников тепловыделения

2.2.1. Машины с двигателями внутреннего сгорания

Для определенности в данном разделе рассматриваются самоходные горные машины — именно они чаще всего оборудуются двигателями внутреннего сгорания для обеспечения мобильности и служат для перемещения людей, грузов, а также служат как самоходная база для широкой линейки технологического оборудования: буровых машин, машин для крепления и транспортировки взрывчатых материалов, перевозки людей и т.д.

На рисунке 2.7 приведены термограммы подземных самоходных машин в процессе работы. Видно, что машины являются мощными источниками тепловыделения и отдельные рабочие части машины имеют температуру выше +40 °С.

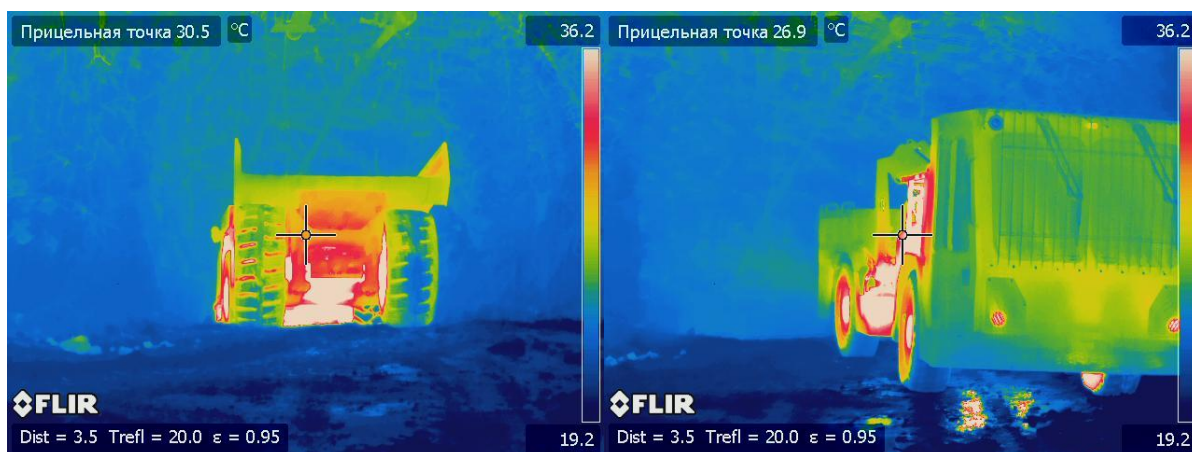


Рисунок 2.7 — Термограммы работающей самоходной дизельной техники

При работе двигателей внутреннего сгорания часть теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, идёт на совершение работы, оставшаяся часть превращается в теплоту. При движении машины полезная работа, совершаемая двигателем, идёт на преодоление сил трения, которые носят диссипативный характер и, в конечном итоге, также преобразуют работу в теплоту. Часть работы, связанная с преодолением потенциальной силы тяжести, например, при подъеме машины вверх, крайне мала из-за малых углов наклона транспортных выработок. Таким образом, можно считать, что вся энергия, выделяющаяся при сгорании топлива, в конечном итоге преобразуется в теплоту.

Другой вопрос, какая часть из этой теплоты передается непосредственно воздуху. При взаимодействии горной машины с окружающей средой часть теплоты отводит-

ся в рудничную атмосферу, а часть — в окружающий породный массив, еще часть — на протекание фазовых переходов влаги в рудничной атмосфере с учетом выделения продуктов сгорания топлива. Точное определение этих частей в зависимости от внешних условий и конструкции машины, а также неопределенности распределения диссипативных потерь энергии в системе «двигатель — трансмиссия — колеса — почва» представляет собой крайне сложную задачу. Поэтому в данном разделе ставится задача развития феноменологической модели расчета тепловыделения от двигателей внутреннего сгорания и ее параметрического обеспечения на основе фактических данных.

Исходя из представленного обоснования полного выделения теплоты сгорания топлива в окружающую среду, справедливо выражение

$$W_{\text{двс}} = \frac{P_p \cdot C_T \cdot K_{\text{двс}} \cdot 1000}{3600}, \quad (2.1)$$

где P_p — средний расход топлива, кг/час;

C_T — удельная теплота сгорания топлива, МВт/кг.

$K_{\text{двс}}$ — безразмерный коэффициент интенсивности тепловыделения, равный отношению теплоты, выделяющейся в рудничную атмосферу, к общему количеству теплоты, выделяющемуся при сгорании топлива.

Средний расход топлива рассчитывается на основе технических характеристик горных машин следующим образом

$$P_p = N_{\text{двс}} \cdot p_p \cdot f_n, \quad (2.2)$$

где $N_{\text{двс}}$ — номинальная мощность двигателя внутреннего сгорания, кВт;

p_p — удельный расход топлива, кг/кВт · час;

$f_n(t)$ — безразмерный коэффициент, равный доле мощности, вырабатываемой двигателем, от его номинальной мощности, принимает минимальное значение при холостых оборотах, и максимальное при максимальных оборотах двигателя.

Подстановка выражения (2.2) в (2.1) дает окончательное выражение в виде

$$W_{\text{двс}} = \frac{N_{\text{двс}} \cdot p_p \cdot f_n \cdot C_T \cdot K_{\text{двс}} \cdot 1000}{3600}. \quad (2.3)$$

Мощность тепловыделения при известных теплоемкости и расходе воздуха, а также приращении температуры из-за действия источника тепловыделения, определяется следующей формулой

$$W_{\text{двс}} = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T, \quad (2.4)$$

где c — теплоемкость обдувающего машину воздуха, кДж/кг;

ρ — плотность обдувающего машину воздуха, кг/м³;

Q — расход воздуха в выработке с горной машиной, м³/с;

ΔT — прирост температуры воздуха из-за работы машины, °С.

Приравнивание выражений (2.3) и (2.4) дает уравнение относительно коэффициента $K_{двс}$, решение которого имеет вид

$$K_{двс} = \frac{3,6 \cdot c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T}{N_{двс} \cdot p_p \cdot f_n \cdot C_T}, \quad (2.5)$$

Для вычисления коэффициента $K_{двс}$ проведены экспериментальные измерения тепловыделений при работе погрузочно-доставочных машин на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». В ходе эксперимента в горных выработках, где находились работающие горные машины, производились измерения расходов и приростов температур воздуха, а также сбор данных об удельном расходе топлива машин и их паспортных характеристиках.

В таблице 2.2 представлены результаты измерений фактического тепловыделения от машин с двигателями внутреннего сгорания по расходу воздуха и приросту его температуры от работы машины. Все измерения произведены при работе машины в режиме номинальной мощности на максимальном числе оборотов двигателя.

Таблица 2.2. — Результаты измерений фактических тепловыделений от машин с двигателями внутреннего сгорания

Наименование машины	Расход воздуха, м ³ /с	Прирост температуры, °С	Тепловыделение привода, кВт
Автосамосвал МоА3-7405-9586	18	6	140
Автосамосвал МТ 433R	21	9	245
ПДМ TORO 400D	23	7	209
ПДМ TORO 151D	18	4	93
ПДМ ST-14	25	7,5	243
ПДМ ST-1030	21	6,5	177
Буровая каретка Boomer H282	18	3	70

В таблице приведены результаты вычисления коэффициента $K_{двс}$ и сравнение фактического тепловыделения от машины с номинальной мощностью ее двигателя.

Таблица 2.3 — Результаты расчета коэффициента $K_{двс}$

Модель машины	Тепловыделение, кВт	Номинальная мощность, кВт	Коэффициент $K_{двс}$
Автосамосвал МоАЗ-7405-9586	140	210	0,18
Автосамосвал МТ 433R	245	358	0,19
ПДМ TORO 400D	209	240	0,25
ПДМ TORO 151D	93	79	0,33
ПДМ ST-14	243	429	0,16
ПДМ ST-1030	177	277	0,19
Буровая каретка Boomer H282	70	112	0,18

Проведенные экспериментальные работы позволяют исследовать диапазон возможного нагрева воздушной струи от работы машины с двигателем внутреннего сгорания в выработке при различных расходах. Из выражения (2.4) следует, что нагрев воздуха определяется следующим образом

$$\Delta T = \frac{W_{двс}}{c \cdot \rho \cdot Q} \quad (2.6)$$

С помощью этого выражения построены графики для наглядного представления зависимости нагрева воздушной струи от мощности тепловыделения и расхода воздуха в выработке, результаты представлены на рисунке 2.8.

Из полученных результатов следует, что локально в горных выработках работа машин может приводить к увеличению температуры воздуха на величину от +7 до +18 °С и существенно влиять на формирование микроклиматических параметров в пределах подземных рабочих зон.

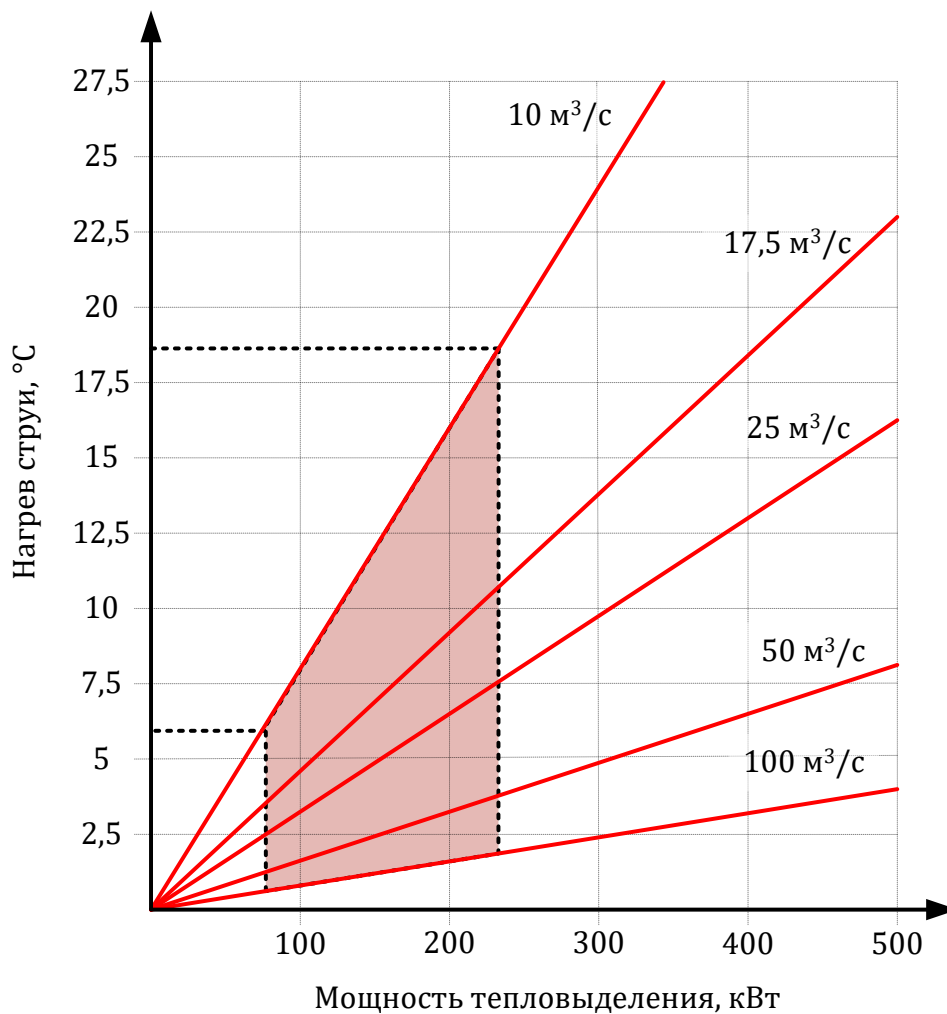


Рисунок 2.8 — Диапазон возможного нагрева воздуха в горных выработках при работе машин с двигателями внутреннего сгорания

В результате проведенных исследований разработана модель и ее параметрическое обеспечение для адекватного математического моделирования влияния работы машин с двигателями внутреннего сгорания на температуру воздуха.

2.2.2. Машины с электрическими приводами

Аналогично рассмотренному случаю машин с двигателями внутреннего сгорания, при потреблении электрической энергии из сети часть ее идет на совершение работы и передается в виде момента на движущиеся и вращающиеся части машин, оставшаяся часть энергии выделяется в виде теплоты на обмотках в электрических машинах, а также в кабельных линиях. Часть работы, идущая на перемещение массы тел в поле силы тяжести, как, например, в случае транспортирования грузов, крайне мала из-за ма-

лых углов наклона выработки. По этой причине основная часть работы идёт на разрушение массива горных пород (отбойка руды комбайновыми комплексами) и преодоление сил трения (трение в машинах и механизмах при отбойке и транспортировке руды), которые преимущественно носят диссипативный характер. С учетом сложности механизмов взаимодействия отдельных конструктивных частей, нестационарности процессов, а также отсутствия универсальных моделей, адекватно описывающих физические процессы при разрушении массивов горных пород и трении, разработать математическую модель, позволяющую на фундаментальном уровне количественно определить часть теплоты, передаваемую рудничной атмосфере при работе машин с электрическими приводами, не представляется возможным. Поэтому по аналогии с двигателями внутреннего сгорания в данном разделе ставится задача развития и параметрического обеспечения феноменологической модели расчета тепловыделений от машин с электрическими приводами.

Экспериментальные наблюдения позволили установить, что тепловыделения от электрических приводов при работе пропорциональны их номинальной установленной мощности

$$W_{эл} = K_{эл} \cdot N_{эл}, \quad (2.7)$$

где $N_{эл}$ — установленная номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$K_{эл}$ - безразмерный коэффициент интенсивности тепловыделения, равный отношению тепловыделений в рудничную атмосферу к общей номинальной установленной мощности электродвигателя.

В условиях рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий» проведены экспериментальные измерения мощности тепловыделений от энергопоездов при работающих (добычной режим) и неработающих (ремонтный режим) комбайновых комплексах. Мощности тепловыделений рассчитывались по формуле

$$W_{двс} = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T, \quad (2.8)$$

где c — теплоемкость обдувающего машину воздуха, кДж/кг;

ρ — плотность обдувающего машину воздуха, кг/м³;

Q — расход воздуха в выработке с горной машиной, м³/с;

ΔT — прирост температуры воздуха из-за работы машины, °С.

В таблице 2.4 приведены результаты расчета мощности тепловыделения энергооборудования лав по формуле (2.8) на основании данных экспериментальных измерений.

Таблица 2.4 — Результаты расчета мощности тепловыделения энергооборудования лав

Лава	Режим работы	Мощность тепловыделения, кВт
2С-2	Добычной, комбайн работает	63
	Добычной, комбайн работает	101
2С-3	Ремонтный, комбайн остановлен	14
	Ремонтный, комбайн остановлен	29
	Добычной, комбайн работает	151
4С-1	Добычной, комбайн работает	84
Среднее	Добычной, комбайн работает	92
	Ремонтный, комбайн остановлен	22

Отдельно произведены замеры тепловыделения при работе комбайна от теплообменника холодильной машины РК-130, установленной на энергопоезде лавы. Вентилятор, установленный на холодильной машине, обеспечивает расход $10 \text{ м}^3/\text{с}$, разность температур воздуха до и после прохождения через теплообменник составляет $5 \text{ }^\circ\text{C}$ и при этом практически не зависит от начальной температуры воздуха. Таким образом, мощность тепловыделения от холодильной машины составляет порядка 64 кВт, что хорошо согласуется с разницей мощностей тепловыделения при работе и остановке комбайна — согласно таблице 2.4 разница составляет 70 кВт.

В таблице 2.5 представлены результаты расчета мощности тепловыделения от электроприводов добычных комбайнов рудников ОАО «Беларуськалий» и их коэффициенты интенсивности тепловыделения.

Таблица 2.5 — Суммарная установленная мощность энергооборудования и результаты расчета мощности их тепловыделения

Тип источника	Суммарная мощность, кВт	Мощность тепловыделения, кВт	Коэффициент интенсивности тепловыделения
Комбайн СЛ-300/400	892	72	0,08
Комбайн СЛ-500С	740	84	0,11
Среднее значение	816	78	0,10

Аналогичные исследования проведены для конвейерных линий в условиях рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий». В исследуемых условиях конвейерные штреки имеют полностью горизонтальное залегание, поэтому при работе конвейеров вся потребляе-

мая приводом мощность за счет диссипативных процессов переходит в тепло. При этом характер тепловыделения является неравномерным. Часть теплоты выделяется на электродвигателях привода (обусловленная наличием КПД двигателей), остальная часть переходит в теплоту из-за сил трения в роликах и ленте конвейерной линии.

На рисунке 2.9 приведены термограммы работающей конвейерной линии и электродвигателя у её приводного барабана. По термограммам можно сделать однозначный вывод о мощном локальном тепловыделении от электродвигателя и распределенных диссипативных тепловыделениях вдоль всей длины конвейерной линии.

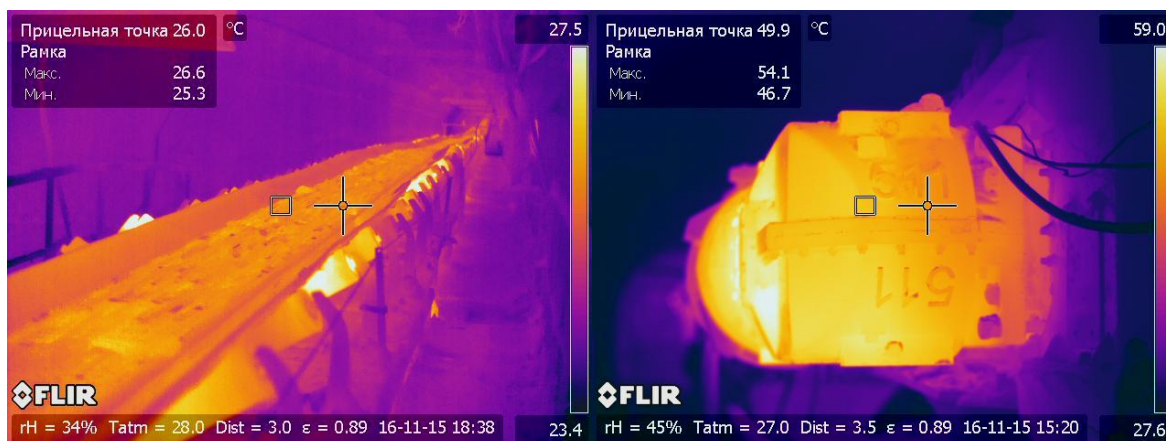


Рисунок 2.9 — Термограммы работающей конвейерной линии и двигателя привода

Выражение, описывающее мощность тепловыделения (кВт) на приводе конвейера, имеет вид

$$W_{\text{привода}} = K_{\text{эл}} \cdot \frac{(100 - \eta)}{\eta} \cdot N_{\text{эл}}, \quad (2.9)$$

$N_{\text{эл}}$ — суммарная потребляемая приводом конвейера активная электрическая мощность, кВт;

η — коэффициент полезного действия электродвигателей привода, %.

Остальная часть теплоты, выделяющейся удельно по длине конвейера (кВт/м), описывается выражением

$$W_{\text{ленты}} = K_{\text{эл}} \cdot \frac{\eta}{100} \cdot \frac{N_{\text{эл}}}{L}, \quad (2.10)$$

L — длина конвейерной линии, м.

В условиях панели № 2 рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий» произведены экспериментальные измерения тепловыделения от приводов конвейерных линий, результаты представлены в таблице 2.6. Расчет производился по формуле (2.8).

Таблица 2.6 — Результаты экспериментальных измерений мощности тепловыделения от приводов конвейерных линий

Конвейер	Расход воздуха, м ³ /с	Нагрев струи, °С	Мощность тепловыделения, кВт
КЛШ-1000	5,1	1,8	11,7
КЛШ-1000	3,9	1,9	9,4
КЛШ-1000	2,8	3,0	10,7
КЛ-600	4,1	1,1	5,6
КЛ-600	2,0	3,0	7,5
Среднее			9

В таблице 2.7 представлены результаты расчета мощности тепловыделения от электроприводов конвейерных линий рудников и их коэффициенты интенсивности тепловыделения.

Таблица 2.7 — Суммарная установленная мощность энергооборудования и результаты расчета мощности их тепловыделения

Тип источника	Номинальная мощность, кВт	Мощность тепловыделения, кВт	Коэффициент интенсивности тепловыделения
Привод конвейера КЛШ-1000	150	12	0,08
Привод конвейера КЛ-600	150	8	0,05
Среднее значение	150	10	0,07

Аналогично комбайновым комплексам, тепловыделения от приводов конвейерных линий значительно меньше установленной номинальной мощности.

Значительное расхождение между номинальной электрической мощностью и мощностью тепловыделений можно объяснить следующими причинами:

- разницей между фактически потребляемой мощностью и номинальной;
- переменной нагрузкой на электродвигатель;
- частичным поглощением тепловыделений окружающим массивом пород.

В результате проведенных исследований разработана модель и ее параметрическое обеспечение для адекватного математического моделирования влияния машин с электрическими приводами на температуру воздуха.

2.2.3. Твердеющие закладочные массивы

В настоящее время на большинстве глубоких рудников применяются системы разработки с управлением кровлей полной закладкой выработанного пространства. Типовой состав используемой закладочной смеси приведен в таблице 2.8.

Таблица 2.8 — Компоненты и составы закладочной смеси на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»

Наименование компонента	Содержание, т/м ³ (%)
Граншлак	0,72 (30,6)
Ангидрит	0,39 (16,6)
Щебень	0,33 (14,0)
Цемент (связующее)	0,14 (5,9)
Прочие	0,77 (32,8)

В процессе твердения закладочного массива происходит химическая реакция гидратации связующего в закладочной смеси. Характерной особенностью такой реакции является экзотермичность. Выделившееся тепло разогревает закладочный массив, теплообмен которого с окружающим породным массивом и рудничным воздухом приводит к их разогреву.

Особую актуальность этот вопрос приобретает при увеличении глубины ведения горных работ, когда температура пород достигает предельно допустимых значений +26 °С и выше — в этом случае дополнительный фактор повышения температуры воздуха играет решающую роль как при прогнозе микроклиматических параметров в рабочих зонах, так и при выборе мероприятий, направленных на их нормализацию.

Необходимо решить задачу количественного определения влияния тепловыделений закладочных массивов на формирование теплового режима в горных выработках рудника и для учета тепловыделений закладочного массива в расчетах теплового режима.

Тепловыделение происходит при твердении связующего в закладочном массиве, в связи с чем в первую очередь необходимо вычислить массу связующего, участвующего в реакции гидратации. Она определяется по формуле

$$m_{cem} = \frac{\psi}{100} \cdot \rho \cdot S \cdot l, \quad (2.11)$$

где ψ — массовая доля связующего в закладочном материале, %;

ρ — плотность закладочного материала, кг/м³;

S — площадь заложеной выработки, м²;

l — длина заложенной выработки, м.

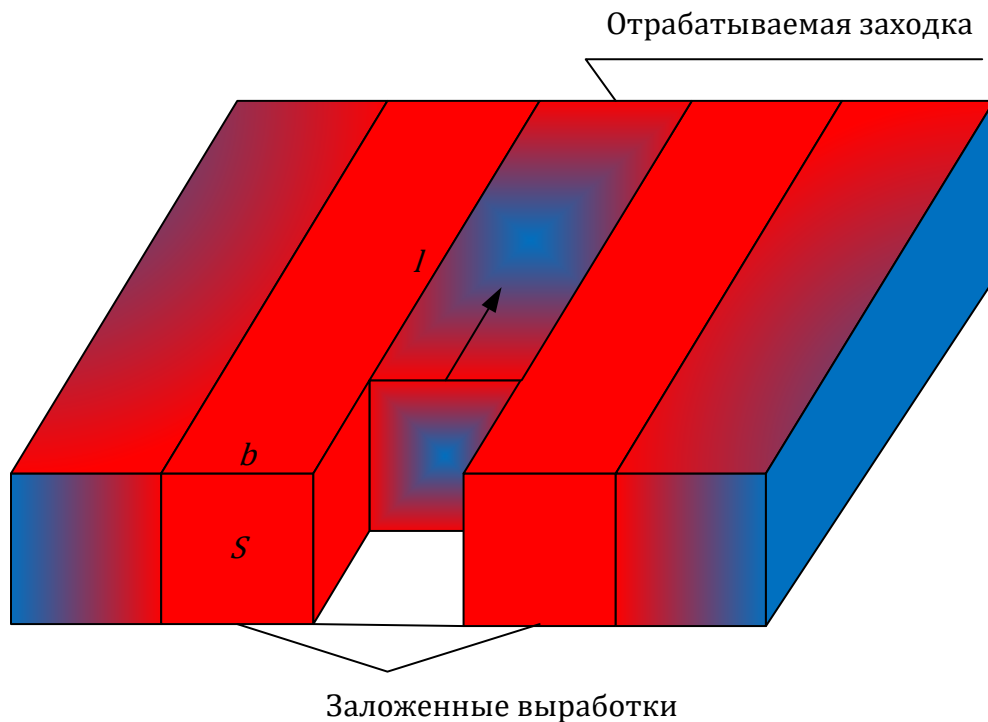


Рисунок 2.10 — Схема к расчету тепловыделений от твердеющего закладочного массива

Суммарное количество теплоты (Дж), выделившееся при твердении массы закладочного материала, можно найти по формуле

$$Q = L_{cem} \cdot m_{cem} \quad (2.12)$$

где L_{cem} — удельная массовая теплота твердения связующего в закладочном материале, Дж/кг.

В то же время, возрастание температуры всего закладочного массива определяется выражением

$$\Delta T = \frac{Q}{c_{cem} \cdot m_{cem}}, \quad (2.13)$$

где c_{cem} — удельная массовая теплоемкость закладочного массива, Дж/кг·°С.

Комбинируя выражения (2.12) и (2.13), нагрев закладочного массива после твердения определяется выражением

$$T = T_0 + \frac{L_{cem}}{c_{cem}}, \quad (2.14)$$

где T_0 — начальная температура закладочного материала, которым произведена закладка камеры, °С.

При расчёте теплораспределения в вентиляционной сети закладочный массив является относительным источником теплоты, аналогичным породному массиву. Иными словами, нагрев воздуха от закладочного массива происходит в результате процесса теплоотдачи «массив — воздух».

2.3. Разработка математической модели сопряженного тепло- и массопереноса в сети горных выработок и массиве горных пород

В этом разделе работы представлена математическая модель сопряженного тепло- и массопереноса в сети горных выработок и окружающем породном массиве, разработанная с учетом характерных особенностей формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников.

Она позволяет производить адекватное моделирование теплофизических и аэродинамических процессов, протекающих в рудничной атмосфере и породных массивах глубоких рудников, и может быть использована для расчетов микроклиматических параметров в горных выработках при решении задач прогнозирования и нормализации теплового режима.

2.3.1. Моделирование распределения воздуха, теплоты и влаги в сети горных выработок

В наиболее общем виде постановку сетевой задачи сопряженного расчета распределения температуры воздуха в сети горных выработок глубоких рудников можно выполнить следующим образом.

Математически рудничная вентиляционная сеть представляется в виде ориентированного графа, содержащего m узлов и n ветвей, соединяющих данные узлы. Каждая ветвь графа моделирует горную выработку или эквивалент системы горных выработок, а каждый узел графа моделирует их сопряжения. На основании этого каждая j -ая ветвь графа характеризуется аэродинамическим сопротивлением R_j , длиной L_j , площадью поперечного сечения S_j и наличием искусственных источников тяги H_{ventj} .

Для расчета воздухораспределения требуется рассмотрение уравнений движения воздушной среды, а расчет теплораспределения требует рассмотрения уравнений конвективно-диффузионного типа. Поэтому несмотря на тесную связь данных процессов, разработка математической модели расчета тепло- и воздухораспределения в сети горных выработок проведена в два этапа:

— расчет воздухораспределения в сети горных выработок;

— расчет теплораспределения и термодинамических процессов в сети горных выработок.

Расчет воздухораспределения в сети горных выработок осуществляется на основании закона сопротивления, описывающего перепад давления воздуха (депрессию) в выработке при его течении по выработке с определенным аэродинамическим сопротивлением, и имеющего вид

$$H_j = R_j \cdot |Q_j| \cdot Q_j - H_{ventj} - \rho_j \cdot L_j \cdot g \cdot \sin\alpha_j, \quad (2.15)$$

где ρ_j — средняя плотность воздуха j -ой ветви, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

α_j — угол наклона j -ой ветви, радиан.

Третье слагаемое в выражении (2.15) описывает гидростатическое давление, которое создаёт вес столба воздуха.

На основании второго закона Кирхгофа [88] можно записать, что вдоль любого замкнутого контура C в вентиляционной сети должно быть

$$\sum_{j \in C} (R_j \cdot |Q_j| \cdot Q_j - H_{ventj}) = \sum_{j \in C} L_j \cdot g \cdot \sin\alpha_j. \quad (2.16)$$

При этом по сравнению с обычной записью расписанного второго закона Кирхгофа, в полученном выражении в правой части добавился новый член, который учитывает разницу весовых столбов ветвей, входящих в рассматриваемый замкнутый контур. Это дополнительное слагаемое описывает тепловую депрессию.

Уравнение (2.16) записывается для каждого независимого контура данной сети и дополняется уравнениями, полученными для узлов при помощи первого закона Кирхгофа, выражающего баланс объемных расходов воздуха в каждом узле сети [88,155]

$$\sum_{j \in n} Q_j = 0. \quad (2.17)$$

Полученная таким образом система линейных уравнений решена методом контурных расходов [88].

Уравнения переноса теплоты и влаги в горных выработках в одномерном случае в наиболее общем виде записываются в виде параболических уравнений конвективно-диффузионного переноса

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q}{c \cdot \rho} \\ \frac{\partial AH}{\partial t} + v \frac{\partial AH}{\partial x} = D \frac{\partial^2 AH}{\partial x^2} + W_{AH} \end{cases}, \quad (2.18)$$

где T — температура воздуха, °С;

x — продольная координата вдоль длины выработки, м;

t — координата времени, с;

v — скорость движения воздуха по горной выработке, м/с;

χ — коэффициент турбулентной теплопроводности, м²/с;

q — функция распределения плотности теплового потока, °С/с;

c — теплоёмкость воздуха, Дж/кг·°С;

ρ — плотность воздуха, кг/м³;

AH — абсолютная влажность воздуха, кг/кг;

D — коэффициент турбулентной диффузии влаги, м²/с;

W_{AH} — функция источника.

Для всех действующих горных выработок в силу их интенсивного проветривания и большой протяженности выполняются следующие условия

$$\begin{aligned} vL &\gg \chi \\ vL &\gg D' \end{aligned} \quad (2.19)$$

где L — длина выработки.

Физически данная оценка означает, что диффузионными процессами переноса теплоты и влаги вдоль оси выработки можно пренебречь в силу их малости относительно конвективной (трансляционной) составляющей переноса. Таким образом, для моделирования процессов переноса в сетевых задачах целесообразно использовать уравнения переноса в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{q}{c \cdot \rho} \\ \frac{\partial AH}{\partial t} + v \frac{\partial AH}{\partial x} = W_{AH} \end{cases}. \quad (2.20)$$

Для численного решения уравнений такого вида подходит модель идеального вытеснения. Вид явной численной схемы по времени уравнений (2.20) будет иметь вид

$$\begin{aligned} T(x, t + \Delta t) &= T(x - \Delta x, t) + \frac{q(x - \Delta x, t)}{c \cdot \rho} \cdot \Delta t \\ AH(x, t + \Delta t) &= AH(x - \Delta x, t) + W_{AH}(x - \Delta x, t) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (2.21)$$

Физически это соответствует тому, что воздух, перемещаясь из одной расчетной ячейки в другую, переносит в нее свои физические параметры, которые требуется лишь

скорректировать на учет влияния источников выделения или поглощения теплоты и влаги.

Создание расчетной схемы на базе модели идеального вытеснения предполагает разбиение каждой ветви на N_j ячеек наиболее удобным образом так, что длина каждой i -ой ячейки j -ой ветви Δx_{ij} равна расстоянию, которое проходит воздушная среда за выбранный шаг по времени Δt . При таком разбиении шаг по координате и число шагов в каждой ветви графа определяются следующими соотношениями

$$\begin{aligned}\Delta x_{ij} &= v_j \Delta t \\ N_j &= \frac{L_j}{\Delta x_{ij}},\end{aligned}\tag{2.22}$$

где Δt — задаваемый шаг по времени, с;

v_j — скорость движения воздуха в j -ой ветви, м/с;

L_j — длина j -ой ветви, м.

При этом объем воздуха, который находился в ячейке Δx_{ij} , через время Δt переместится в следующую ячейку Δx_{i+1j} , а на его место придет объем из предыдущей ячейки, то есть Δx_{i-1j} , и т.д., — в полном соответствии с численной схемой модели идеального вытеснения. Схема дискретизации выработок и суть расчета по модели идеального вытеснения приведены на рисунке 2.11.

В рамках модели предполагается, что все физические параметры внутри каждого элементарного объема, занимающего ячейку, однородны и изменение происходит только при переходе объема из ячейки в ячейку. Однако это предположение требует адекватного подбора шага по времени. Слишком маленький шаг по времени приводит к большому числу участков и возрастанию вычислительной сложности задачи, слишком большой шаг по времени приводит к снижению точности. Кроме того, дополнительным ограничителем является тот факт, что в случае малых расходов и, следовательно, скоростей движения воздуха длина ячейки также получается маленькой, а число шагов — большим. При скоростях воздуха, стремящихся к нулю, число участков стремится к бесконечности, поэтому при реализации алгоритма расчета предусмотрено задание минимального расхода, который используется для расчета в том случае, если расход в выработке падает меньше этого заданного значения.

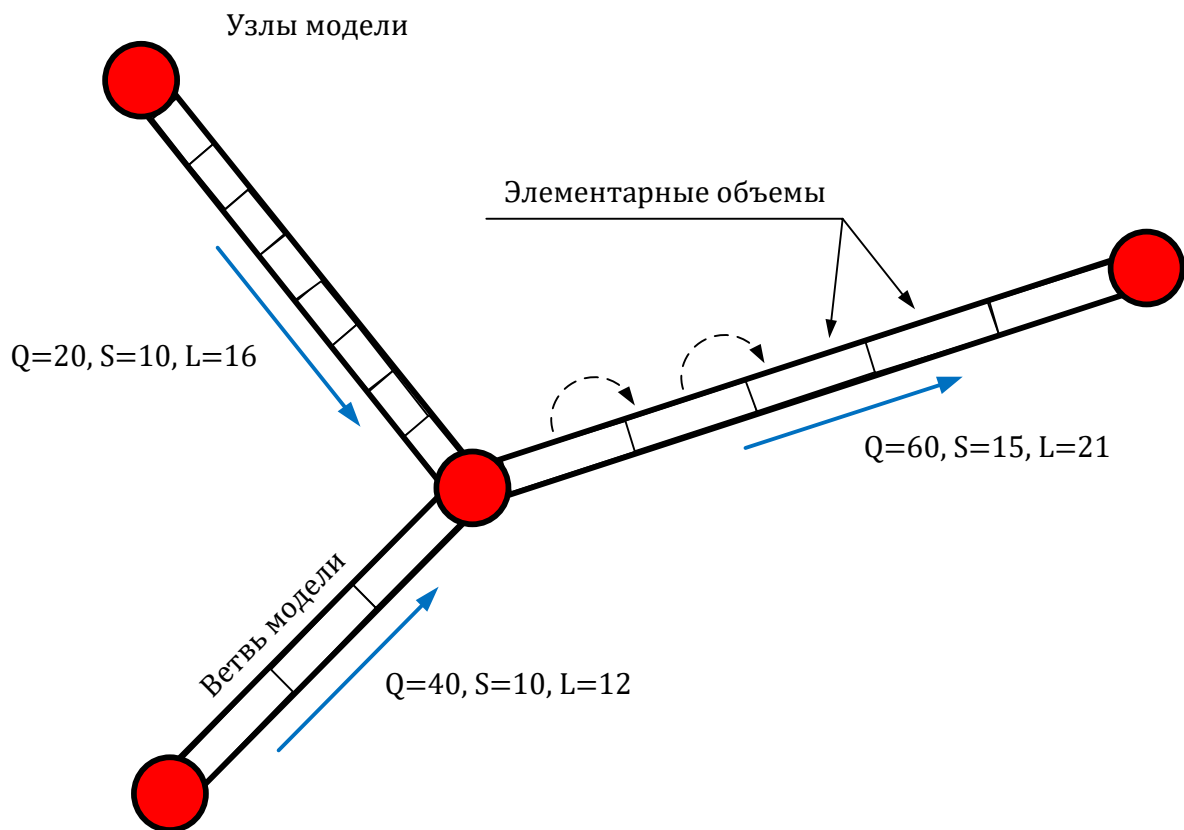


Рисунок 2.11 — Схема к разбиению ветвей модели на элементарные объемы для расчета в рамках модели идеального вытеснения

С другой стороны, сложность представляет существенная разнородность параметров выработок. Например, вентиляционные каналы и выработки околоствольного двора являются короткими, но с большой скоростью движения воздуха. Поэтому для их дискретизации требуется крайне маленький шаг по времени, использование которого для всех ветвей модели значительно увеличит вычислительную нагрузку, что является нецелесообразным. Для учёта этой особенности при реализации алгоритма учтена возможность использования в качестве расчетных ячеек ветви ее начального и конечного узлов. В таком случае на каждом шаге по времени расчетные параметры передаются из начального узла в конечный.

В целом процесс расчета параметров воздуха выглядит следующим образом. Модельное время увеличивается дискретно в соответствии с выбранным шагом по времени. На каждом шаге по времени есть известный массив расходов воздуха, полученный в ходе решения задачи стационарного воздухораспределения. По этому массиву расходов воздуха, длинам и сечениям ветвей происходит дискретизация всех ветвей на расчетные ячейки. По параметрам воздуха в ячейках на предыдущем шаге по времени происходит пересчет параметров воздуха в текущих ячейках. Для этого происходит линейная интерполяция распределения параметров воздуха по длине ветви и пересчет па-

раметров воздуха в новых ячейках по построенному распределению так, как это представлено на рисунке 2.12

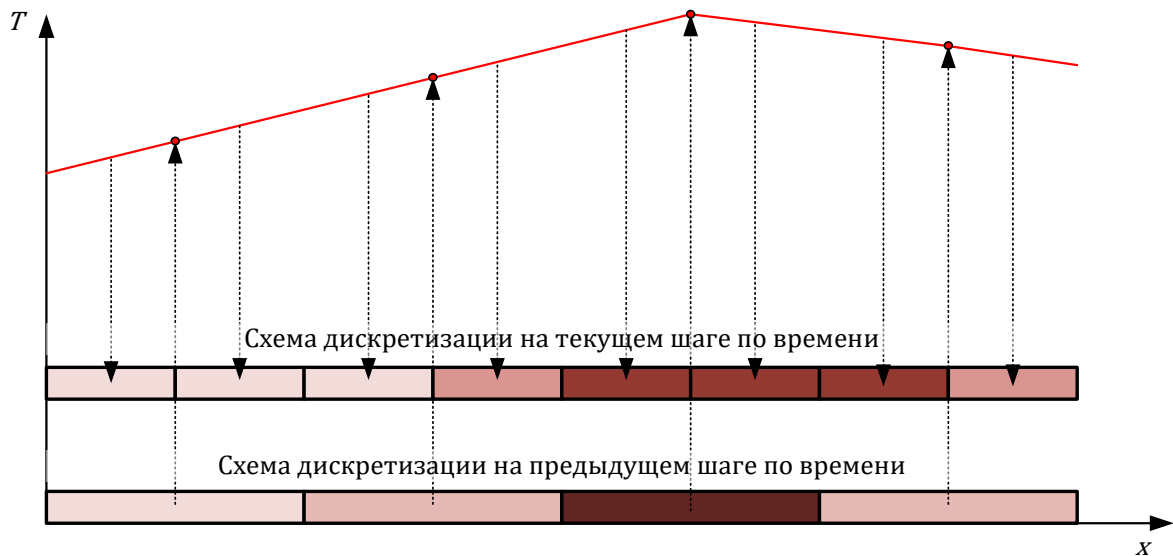


Рисунок 2.12 — Схематичное изображение расчета параметров воздуха при смене дискретизации ветви

Подобный метод интерполяции массива параметров воздуха позволяет добиться непрерывности изменения этих параметров при резком увеличении числа участков.

В узлах модели принята модель идеального смешивания. Иными словами, предполагается, что параметры воздуха усредняются по объемным расходам, то есть для температур и влагосодержаний воздуха справедливы следующие выражения

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

$$AH_k = \frac{\sum_{j \in k} AH_j \cdot Q_j^{input}}{\sum_{j \in k} Q_j^{input}},$$
(2.23)

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

Применение модели идеального смешивания основано на маленьком объеме сопряжений, приток воздуха в которых из всех выработок чаще всего сопровождается полным перемешиванием втекающих потоков и усреднением параметров.

В то же время учёт влагообменных процессов требует дополнительной проверки, не происходит ли при смешивании потоков с существенно различными микроклиматическими параметрами конденсация влаги и дополнительное тепловыделения. Механизму учёта данного процесса посвящен раздел 2.3.3.

Расчет распределения температуры в выработках осуществляется по формуле

$$T_{ij}^{t+1} = T_{i-1j}^t + \frac{W_{ij}^t \cdot \Delta t}{c_a \cdot \rho_{ij} \cdot S_j \cdot \Delta x_{ij}} + \frac{\alpha_j \cdot (T_{i,j}^t - \tau_{0,i,j}^t) \cdot F_{ij} \cdot \Delta t}{c_a \cdot \rho_{ij} \cdot S_j} + \frac{g \cdot \Delta x_{ij} \cdot \sin \alpha_j}{\left(c_a + \frac{R}{M}\right)}, \quad (2.24)$$

где T_{ij}^{t+1} — температура воздуха в i -ой ячейке j -ой ветви в рассчитываемый момент времени, °С;

W_{ij}^t — количество теплоты, выделяющееся от техногенных источников в i -ой ячейке j -ой ветви в момент времени t , Вт;

c_a — теплоёмкость воздуха, Дж/кг·°С;

α_j — коэффициент теплоотдачи на границе «воздух — массив», Вт/м²;

$\tau_{0,i,j}^t$ — температура массива горных пород на границе «воздух — массив» на участке i -ой ячейки j -ой ветви, °С;

F_{ij} — площадь контакта i -ой ячейки j -ой ветви с массивом горных пород, м²;

В выражении (2.24) второе слагаемое учитывает влияние техногенных источников тепловыделения, третье — влияние теплообмена воздуха с окружающим породным массивом, четвертое — гидростатический нагрев/охлаждение воздуха при его движении по вертикальным или наклонным горным выработкам.

При расчете теплообменных процессов в вертикальных и наклонных горных выработках важно учитывать гидростатическое сжатие/расширение воздуха при движении в поле тяжести и влияние данного процесса на формирование температурного поля. Данные факторы сказываются тем больше, чем больше длина и глубина горных выработок, поэтому в условиях глубоких рудников эти факторы имеют определяющее значение и должны учитываться при проведении расчетов.

Первый закон термодинамики при движении элементарной массы воздуха в поле силы тяжести в адиабатическом приближении имеет следующий вид [159]

$$c \cdot \Delta m \cdot dT = \frac{\Delta m \cdot R \cdot T}{M \cdot \rho} d\rho. \quad (2.25)$$

Плотность воздуха является функцией двух переменных — давления и температуры, поэтому ее дифференциал представляется в виде

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial T} dT + \frac{\partial \rho}{\partial P} dP. \quad (2.26)$$

Частные производные при использовании уравнения состояния идеального газа вычисляются следующим образом

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial T} &= -\frac{P \cdot M}{R \cdot T^2} \\ \frac{\partial \rho}{\partial P} &= \frac{M}{R \cdot T}\end{aligned}\quad (2.27)$$

Подставляя их в первый закон термодинамики, получим:

$$c \cdot \Delta m \cdot dT = \frac{\Delta m \cdot R \cdot T}{M \cdot \rho} \cdot \left(-\frac{P \cdot M}{R \cdot T^2} \cdot dT + \frac{M}{R \cdot T} \cdot dP \right). \quad (2.28)$$

После математических преобразований выражение принимает вид:

$$\left(c + \frac{R}{M} \right) \cdot dT = -g \cdot dz. \quad (2.29)$$

Полученное выражение позволяет произвести корректировку выражения для пересчета температуры воздуха с учетом гидростатического сжатия следующим образом:

$$\Delta T = \frac{g \cdot \Delta z}{\left(c + \frac{R}{M} \right)}. \quad (2.30)$$

Последнее слагаемое учитывает гидростатический разогрев или охлаждение воздуха при его движении в вертикальном поле тяжести.

Разработанная математическая модель позволяет производить расчет теплораспределения в рудничной атмосфере и породном массиве в вертикальных наклонных выработках с учетом наличия крепи на стенках выработки, конечного значения коэффициента теплоотдачи на границе «воздух — горные породы», гидростатического сжатия-расширения воздуха, оказывающего значительное влияние на формирование поля температур глубоких стволов.

Важно отметить, что температура массива горных пород на границе «воздух — массив» не является величиной постоянной, для ее расчета разработана модель сопряженного теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород, изложенная в разделе 2.3.2.

2.3.2. Учёт сопряженного теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом

В полученном выражении для пересчета температуры рудничного воздуха (2.24) имеется слагаемое, определяющее изменение температуры по причине теплообмена с массивом окружающих горных пород, в виде

$$\Delta T_{ij}^m = \frac{\alpha_j \cdot (T_{i,j}^t - \tau_{0,i,j}^t) \cdot F_{ij} \cdot \Delta t}{c_a \cdot \rho_{ij} \cdot S_j}, \quad (2.31)$$

где $\tau_{0,i,j}^t$ — температура массива горных пород на границе «воздух — массив» на участке i -ой ячейки j -ой ветви, °С.

Эта температура, по сути являющаяся температурой стенки выработки, не является постоянной и теплообмен массива горных пород с воздухом приводит к тому, что вокруг горной выработки образуется растепленный участок массива, так называемая «температурная рубашка», радиус которой равен расстоянию от стенки выработки до участка массива, где температура не отличается от естественной температуры нетронутого массива.

Непосредственно процесс решения задачи разбивается на несколько стадий: определение законов переноса теплоты и массы в породном массиве, дискретизация расчетных областей, разработка численной схемы и алгоритма решения.

Задача теплообмена воздушной среды с породным массивом в отдельной ячейке ставится следующим образом. Массив горных пород моделируется полым цилиндром так, как это представлено на рисунке 2.13. Внутренний радиус цилиндра r_0 равен радиусу горной выработки. Внешний радиус цилиндра R равен радиусу теплового влияния — расстоянию, где температура все время моделирования остается равной естественной температуре непо потревоженного массива.

Тепловой поток в породном массиве определяется на основании закона теплопроводности Фурье, с учетом представленных обозначений [91]

$$q_m = \lambda_m \frac{\partial \tau}{\partial r}, \quad (2.32)$$

где λ_m — теплопроводность горных пород, Вт/м·°С.

Математически задача теплообмена моделируется как цилиндрически симметричная с двумя пространственными координатами — вглубь массива радиальной r и горизонтальной (продольной по длине выработки) x . Расчет распределения теплоты в породном массиве осуществляется на основе метода конечных объемов [119]. Для этого массив дискретизируется по радиальной координате с заданным шагом Δr и по заданной временной координате с шагом Δt . Определим следующую индексацию для переменных: l — для радиальной координаты r и t — для временной координаты.

Схема дискретизации породного массива в радиальном направлении приведена на рисунке 2.14.

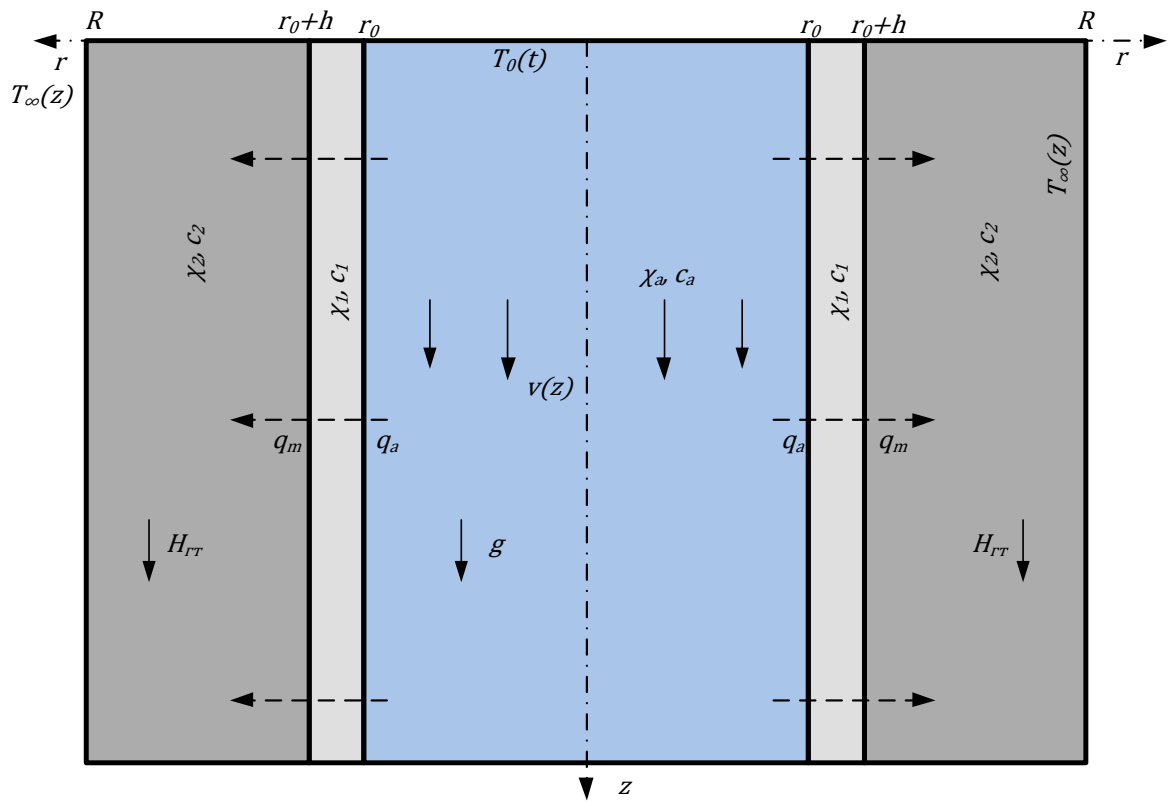


Рисунок 2.13 — Схема к постановке задачи теплообмена между воздухом, крепью и горным массивом в вертикальной горной выработке

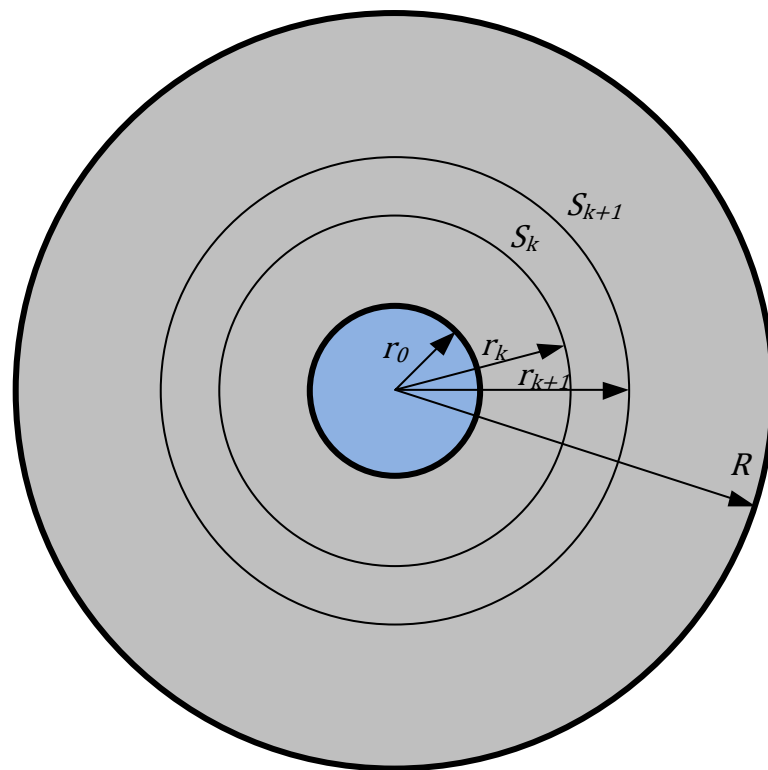


Рисунок 2.14 — Схема дискретизации расчетной области породного массива

Поскольку теплоёмкость горных пород на порядки выше объёмной теплоёмкости воздуха, для корректного моделирования теплового взаимодействия массива и воздуха радиальный шаг в приконтурной части массива выбирается так, чтобы суммарное количество теплоты во взаимодействующем с воздухом объеме массива было сопоставимо (для определенности примем равным) с количеством теплоты в объеме ячейки воздуха:

$$c_a \cdot \rho_a \cdot \Delta V_a = c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta V_m. \quad (2.33)$$

Выражая элементарные объемы для воздуха и массива через заданные пространственные шаги, получим соотношение

$$c_a \cdot \rho_a \cdot \pi \cdot r_0^2 = c_m \cdot \rho_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \Delta r_0. \quad (2.34)$$

Из него выражение для начального шага дискретизации породного массива по радиальной координате получим в виде:

$$\Delta r_0 = \frac{c_a \cdot \rho_a \cdot r_0}{2 \cdot c_m \cdot \rho_m}. \quad (2.35)$$

Подставляя характерные значения $r_0 = 2$ м, $c_a = 1004$ Дж/кг, $\rho_a = 1,22$ кг/м³, $c_m = 895$ Дж/кг, $\rho_m = 2100$ кг/м³, получим значение для начального шага по координате $\Delta r = 0,0006$ м. В то же время производить расчет с таким шагом по всему радиальному пространству массива не целесообразно, так как это потребует лишних затрат вычислительных ресурсов. Поэтому радиальная сетка задаётся неравномерной, с коэффициентом увеличения, и шаг вычисляется следующим образом

$$\Delta r_{l+1} = K \cdot \Delta r_l, \quad (2.36)$$

где $K > 1$ — коэффициент увеличения шага.

При таком определении закона увеличения радиального шага l -ый шаг определяется через начальный шаг и коэффициент увеличения следующим образом

$$\Delta r_l = K^l \cdot \Delta r_0. \quad (2.37)$$

Численная схема решения задачи теплораспределения в породном массиве строится на основе составления системы балансовых уравнений теплоты в различных ячейках массива, при этом используются следующие упрощения. Поскольку температурный градиент в массиве в радиальном направлении намного превышает температурный градиент в продольном направлении, можно пренебречь теплообменом в направлении координаты x . В таком случае на каждом пространственном слое продольной координаты для каждого радиального слоя составляется следующее уравнение баланса теплоты

$$\Delta Q_{l,i,j} = q_{l,i,j} \cdot S_{l,i,j} \cdot \Delta t - q_{l+1,i,j} \cdot S_{l+1,i,j} \cdot \Delta t, \quad (2.38)$$

где $\Delta Q_{l,i,j}$ — изменение теплоты ячейки с индексами i и j породного массива за интервал времени Δt ;

$q_{l,i,j}$ — тепловой поток от ячейки $l - 1$ к l ;

$q_{l+1,i,j}$ — тепловой поток от ячейки l к $l + 1$;

$S_{l,i,j}$ — поверхность границы контакта ячеек $l - 1$ и l ;

$S_{l+1,i,j}$ — поверхность границы контакта ячеек l и $l + 1$.

Изменение количества теплоты связано с изменением температуры ячейки как:

$$\Delta Q_{l,i,j} = c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta V_{l,i,j} \cdot (\tau_{l,i,j}^t - \tau_{l,i,j}^{t-1}), \quad (2.39)$$

где c_m — удельная массовая теплоемкость горных пород;

ρ_m — плотность горных пород;

$\Delta V_{l,i,j}$ — объем ячейки с индексами i и j ;

$\tau_{l,i,j}^t$ — температура пород в рассматриваемой ячейке в момент времени k ;

$\tau_{l,i,j}^{t-1}$ — температура пород в рассматриваемой ячейке в момент времени $k - 1$.

Тепловой поток в твердом теле связан с температурным градиентом согласно закону Фурье

$$q_{l,i,j} = -\lambda_m \frac{\tau_{l,i,j}^t - \tau_{l-1,i,j}^t}{\Delta r_{l,j}}, \quad (2.40)$$

где λ_m — теплопроводность горных пород;

$\Delta r_{l,j}$ — радиальный шаг в ячейке с индексами l и j .

Подставляя выражения (2.39) и (2.40) в исходное балансовое уравнение (2.38) получается:

$$\begin{aligned} c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta V_{l,i,j} \cdot (\tau_{l,i,j}^t - \tau_{l,i,j}^{t-1}) &= \\ &= -\lambda_m \frac{\tau_{l,i,j}^t - \tau_{l-1,i,j}^t}{\Delta r_{l,j}} \cdot S_{l,i,j} \cdot \Delta t \\ &+ \lambda_m \frac{\tau_{l+1,i,j}^t - \tau_{l,i,j}^t}{\Delta r_{l+1,j}} S_{l+1,i,j} \Delta t. \end{aligned} \quad (2.41)$$

После проведения соответствующих математических преобразований и ввода следующих обозначений:

$$\begin{aligned} a_{l,i,j} &= \frac{\lambda_m \cdot S_{l,i,j} \cdot \Delta t}{c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta V_{l,i,j} \cdot \Delta r_{l,i,j}} \\ b_{i,j} &= \frac{\lambda_m \cdot S_{l+1,i,j} \cdot \Delta t}{c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta V_{l,i,j} \cdot \Delta r_{l,j}} \end{aligned}$$

последнее выражение можно записать в виде:

$$-a_{l,i,j}T_{l-1,i,j} + (1 + a_{l,i,j} + b_{l,i,j})T_{l,i,j} - b_{l,i,j}T_{l+1,i,j} = T_{l-1,i,j}. \quad (2.42)$$

На граничной ячейке $i = 0$ балансовое уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta V_{0,j} \cdot (T_{0,i,j} - T_{0,i,k}) = \\ = \alpha(T_{j,k-1}^a - T_{0,j,k})S_0\Delta t \\ + \lambda_m \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k}}{\Delta r_{i+1,j}} S_{i+1,j+1}\Delta t. \end{aligned} \quad (2.43)$$

На граничной ячейке $i = N_r$ температура фиксирована и равна температуре непо- тревоженного массива.

Для учета наличия горной крепи или покрытия, нанесенного на контур выработ- ки, с теплофизическими свойствами, отличными от теплофизических свойств массива, требуется использовать эффективный коэффициент теплоотдачи, который определяет- ся по формуле

$$\alpha_{eff} = \frac{\alpha \cdot \lambda}{\lambda + h}, \quad (2.44)$$

где α — коэффициент теплоотдачи на границе «воздух — крепь», Вт/м²·°С;

λ — коэффициент теплопроводности материала крепи или покрытия, Вт/м·°С;

h — толщина крепи или покрытия, м.

Для учета наличия естественного геотермического состояния породного массива задается функция распределения температуры горных пород с глубиной следующим образом:

$$T_{i,j,0} = T_0 + \frac{j \cdot \Delta z}{H}, \quad (2.45)$$

где H — величина геотермической ступени, м.

Таким образом, начальное поле распределения температуры массива является линейно возрастающей функцией.

Система линейных уравнений (2.42) и (2.43) решена с помощью метода LU- разложения.

Начальный шаг по координате (м), определяющий толщину расчетного слоя массива, окружающего горную выработку, определяется по следующей формуле:

$$\Delta r_0 = \frac{c_a \rho_a r_0}{2c_m \rho_m}, \quad (2.46)$$

где c_a — удельная массовая теплоемкость воздушной среды, Дж/кг;

ρ_a — плотность воздушной среды, кг/м³;

r_0 — радиус горной выработки, м;

c_m — удельная массовая теплоемкость горных пород, Дж/кг;

ρ_m — плотность горных пород, кг/м³.

Радиус теплового влияния выработки определяется по формуле [60]:

$$R = \sqrt{4\chi\tau \cdot \ln\left(\frac{s \cdot \Delta T_0}{0,4 \cdot \pi \cdot \chi \cdot \tau}\right)}, \quad (2.47)$$

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.

Решение задачи позволяет производить расчет теплораспределения в рудничной атмосфере и породном массиве в горизонтальных горных выработках с учетом наличия крепи на стенках выработки и конечным значением коэффициента теплоотдачи на границе «воздух — горные породы».

2.3.3. Учёт влагообмена в атмосфере горных выработок

Помимо процессов теплообмена в рудничной атмосфере существуют процессы влагообмена, так как в выработках происходит конденсация или испарение влаги. Процессы влагообмена характеризуются значительной теплотой фазового перехода, которая при испарении влаги поглощается из воздуха, а при конденсации — выделяется в воздух. Таким образом, необходимо осуществлять учёт влияния этой теплоты фазового перехода на формирование распределения температур воздуха в выработках. Кроме того, процессы конденсации влаги часто характерны при рассмотрении локальных процессов — например, при охлаждении воздуха в системе кондиционирования, или при слиянии двух влагонасыщенных потоков воздуха с существенно различными температурами.

В рамках предложенной численной схемы решения задачи теплораспределения в сети горных выработок на основе модели идеального вытеснения разработана следующая модель расчета влагообменных процессов. К учитываемым параметрам воздуха добавляются абсолютная AH и относительная RH влажности воздуха

$$P_{sat} = 100 \cdot 6,1 \cdot e^{-\frac{17,6 \cdot T}{T+243}} \quad (2.48)$$
$$RH = \frac{AH \cdot R_{air} \cdot (T + 273)}{P_{sat}} \cdot 100,$$

где P_{sat} — давление насыщенного водяного пара при указанной температуре, Па;

T — текущая температура воздуха, °C.

В разработанной модели предлагается два способа задания интенсивности выделения или поглощения влаги. Первый способ основан на измерении перепада относительной влажности воздуха в выработке при определенном расходе воздуха. Для этого влажность воздуха задаётся в каждом из конечных узлов выработки, после чего интенсивность испарения рассчитывается с помощью следующей формулы

$$E = (AH_{res} - AH_{in}) \cdot Q, \quad (2.49)$$

где AH_{res} — абсолютная влажность в конечном узле выработки, кг/кг;

AH_{in} — абсолютная влажность в начальном узле выработки, кг/кг;

Q — расход воздуха в выработке, м³/с.

Затем вычисляется удельный коэффициент влаговыведения, нивелирующий площадь, с которой происходило испарение влаги, а также изменение скорости испарения в зависимости от начальной влажности воздуха

$$k_e = \frac{E}{S_{sur} \cdot \left(1 - \frac{RH_{in}}{100}\right) \cdot P_{sat}(T)}, \quad (2.50)$$

где S_{sur} — площадь поверхности испарения, м²;

RH_{in} — относительная влажность воздуха до испарения в него влаги, %.

При этом площадь поверхности испарения рассчитывается как доля от площади всей поверхности выработки. В качестве частного случая можно принять, что испарение происходит со всей площади стенок.

Вторым способом задания интенсивности испарения является непосредственное задание коэффициента k_e как исходного параметра задачи.

Когда коэффициент k_e задан для всех выработок, в которых происходит испарение влаги, пересчёт абсолютной влажности воздуха на участках происходит следующим образом

$$AH_i^{n+1} = AH_i^n + k_e \cdot S_{sur} \cdot \left(1 - \frac{RH_i}{100}\right) \cdot P_{sat}(T_i) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V_i}, \quad (2.51)$$

где AH_i^{n+1} — абсолютная влажность воздуха до испарения влаги на i -ом участке, кг/кг;

AH_i^n — абсолютная влажность воздуха после испарения влаги на i -ом участке, кг/кг;

RH_i — относительная влажность воздуха на i -ом участке до испарения, %;

Δt — шаг по времени, равен времени влагообмена на участке, с;

ΔV_i — выделенный элементарный объем воздуха, м³.

Так как скорость испарения стремится к нулю при приближении относительной влажности воздуха к критическому значению, рост абсолютной влажности воздуха согласно выражению (2.51) никогда не приведет к превышению максимально возможной относительной влажности. В то же время это может произойти вследствие резкого охлаждения насыщенного влагой воздуха в воздухоохладителе или в процессе перемешивания потоков воздуха с разной температурой. В таком случае это будет приводит к конденсации влаги. Поэтому в модели при расчете температуры воздуха на участках абсолютная влажность воздуха дополнительно корректируется следующим образом:

1. Если температура воздуха выросла, значит корректировать температуру и влажность воздуха дополнительно не требуется, так как конденсация влаги происходить не будет.
2. Если температура воздуха снизилась и относительная влажность воздуха для текущей температуры меньше своего критического значения, то корректировка параметров также не требуется.
3. Если температура воздуха снизилась, и относительная влажность воздуха для текущей температуры получилась равной или больше критической, то определяется, какое количество конденсационной влаги должно выпасть.

Для вычисления количества конденсационной влаги требуется решить следующее уравнение

$$RH\left(AH - \Delta AH, T + \frac{\Delta AH \cdot L_{water}}{\rho_{air} \cdot c_{air}}\right) = 0, \quad (2.52)$$

где $RH(AH, T)$ — функция вычисления относительной влажности;

AH — нескорректированная абсолютная влажность воздуха, кг/кг;

ΔAH — искомое количество конденсационной влаги, кг/кг;

T — нескорректированная температура воздуха, °С;

L_{water} — скрытая теплота испарения воды, Дж/кг;

ρ_{air} — плотность воздуха, кг/м³;

c_{air} — удельная теплоёмкость воздуха, Дж/кг·°С.

Решение приведенного уравнения осуществляется численным методом секущих. В процессе испарения влаги в выработке происходит снижение температуры неиспарившейся жидкости. Если считать, что весь образовавшийся недостаток теплоты в конечном итоге будет скомпенсирован отъёмом теплоты у проходящего мимо воздуха (а такое происходит в случае, когда жидкость распылена в виде капель и успевает испариться, не достигая поверхности выработки), то следует включить пересчет температу-

ры воздуха в выработке после испарения. В этом случае температура воздуха на участках корректируется следующим образом

$$T_i^* = T_i - \frac{\Delta AH \cdot L_{water}}{\rho_{air} \cdot c_{air}}. \quad (2.53)$$

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

2.3.4. Верификация разработанной математической модели

Для верификации разработанных математических моделей выполнены прогнозные распределения температур воздуха в стволах рудников «Скалистый» и «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». В стволах действуют все основные факторы, влияющие на формирование микроклиматических условий:

- теплообмен воздуха с окружающим породным массивом, в начальные периоды времени (до 1 часа) интенсифицированный за счет значительного объема воздуха и, как следствие, больших скоростей движения;
- гидростатическое сжатие/расширение воздуха при опускании/подъеме воздушного потока в воздухоподающих и вентиляционных стволах;
- протекание фазовых переходов влаги. В частности, в ходе экспериментальных исследований установлено, что во всех вентиляционных стволах рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» происходит процесс конденсации влаги, что значительно влияет на распределение температуры воздуха в стволах.

Важным моментом является еще совместный характер действия всех этих факторов, что обуславливает необходимость их сопряженного учёта.

Для верификации моделей на начальном этапе проведено обследование стволов с измерением микроклиматических параметров воздуха, поступающего в стволы. Далее по этим данным проведено параметрическое обеспечение разработанных математических моделей с заданием начальных и граничных условий и построены многофакторные тепловые модели стволов. После этого проведены расчеты прогнозируемых распределений температуры и относительной влажности воздуха в стволах.

На следующем этапе выполнены экспериментальные измерения распределения температуры в глубоких стволах шахты «Скалистый» и рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», а также определен участок, на котором начинает происходить конденсация влаги (для вентиляционных стволов).

На заключительном этапе произведено сопоставление данных расчета и измерений по всем исследованным стволам, в наглядном виде результаты сопоставления приведены на рисунках 2.15 и 2.16.

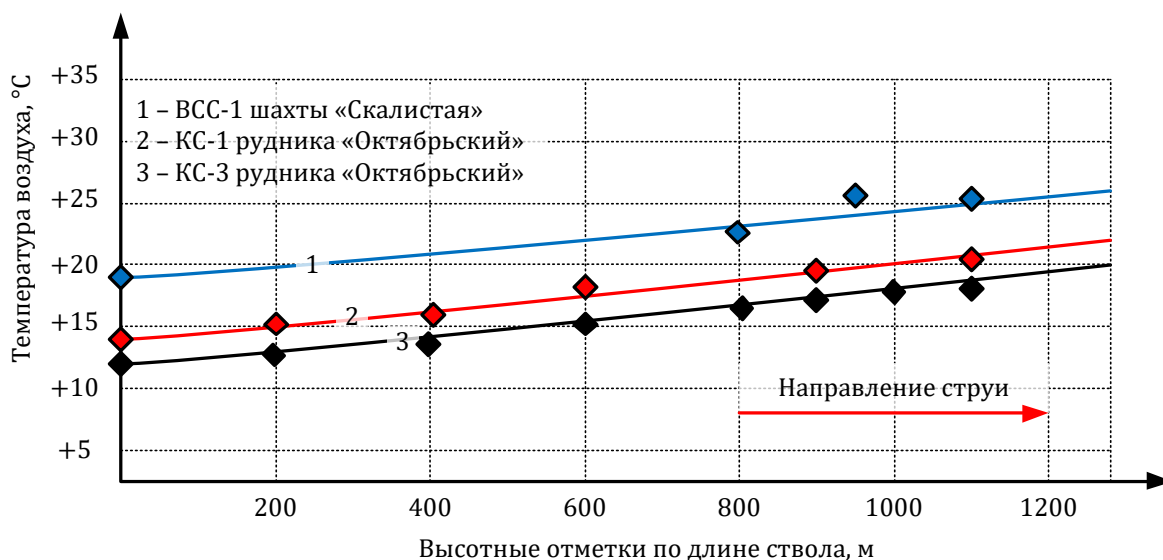


Рисунок 2.15 — Расчетный график изменения температуры воздуха и измеренные значения в воздухоподающих стволах шахты «Скалистая» и рудника «Октябрьский»

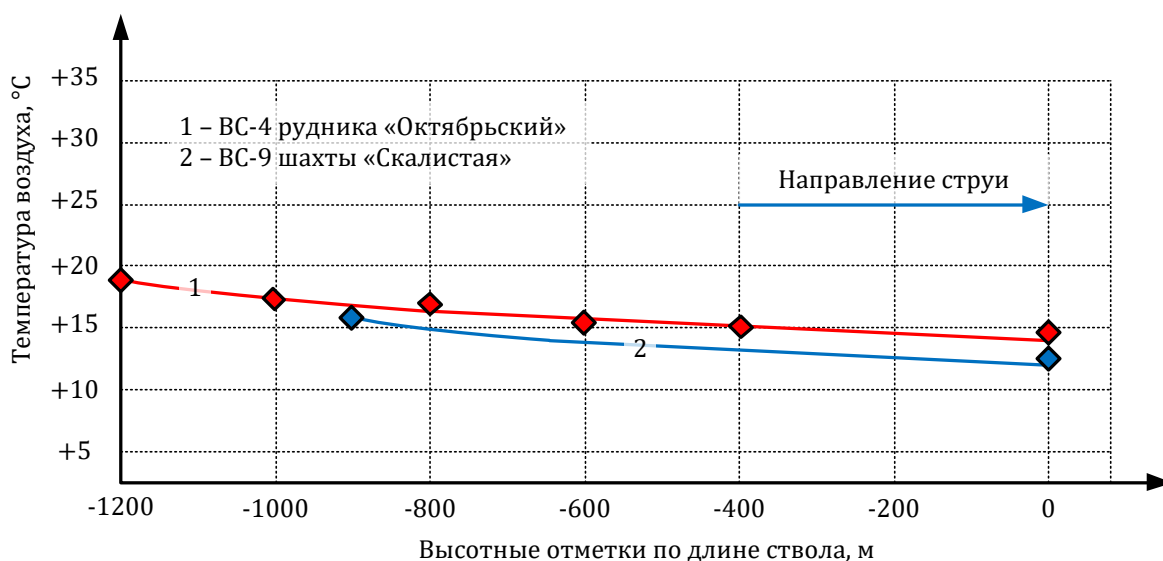


Рисунок 2.16 — Расчетный график изменения температуры воздуха и измеренные значения в вентиляционных стволах шахты «Скалистая» и рудника «Октябрьский»

Согласно рисункам, наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных кривых. Характерной особенностью результатов экспериментальных исследований является линейный закон изменения температуры воздуха по глубине ствола. Этот факт объясняется быстрым формированием тепловыравнивающего слоя и сниже-

нием удельного влияния теплообмена на температуру воздуха в вертикальных горных выработках, что также согласуется с данными моделирования.

2.4. Классификация горных выработок глубоких рудников по факторам формирования теплового режима

Результаты теоретических и экспериментальных исследований факторов формирования теплового режима для различных типов выработок глубоких рудников обобщены в таблице 2.9. В ней отражены факторы, влияющие на формирование теплового режима в горных выработках различного типа с учетом степени их влияния. За счет этого таблица является более совершенной, чем предложенная автором в работе [60].

Таблица 2.9 — Классификация горных выработок по факторам формирования теплового режима

Факторы	Воздухоподающие стволы	Главные воздухоподающие выработки	Подготовительные выработки	Очистные выработки
Начальная температура и влажность воздуха	Сильно	Сильно	Слабо	—
Влагообменные процессы	Слабо	Слабо	Слабо	Слабо
Гидростатическое сжатие	Сильно	—	—	—
Теплообмен с массивом	Слабо	Сильно	Сильно	Сильно
Тепловыделения приводов горных машин	—	—	Сильно	Сильно

Таким образом, в условиях глубоких рудников по основным факторам формирования теплового режима выделяются четыре группы горных выработок (в скобках представлены основные аэродинамические и теплофизические особенности выработок каждой группы):

- Воздухоподающие и вентиляционные стволы (вертикальное пространственное расположение, высокая скорость движения воздуха, малая поверхность контакта воздуха с породным массивом).

- Главные воздухоподающие и вентиляционные выработки (горизонтальное и наклонное пространственное расположение, высокая скорость движения воздуха, малая поверхность контакта воздуха с породным массивом).
- Подготовительные выработки в пределах участков шахтного поля, имеющие сквозное проветривание (низкая скорость движения воздуха из-за распараллеливания общего расхода, большая поверхность контакта воздуха с породным массивом, сильное влияние техногенных источников тепловыделения).
- Очистные выработки (низкая скорость движения воздуха, большая поверхность контакта воздуха с породным массивом, сильное влияние техногенных источников тепловыделения).

С учетом различного характера формирования микроклиматических параметров воздуха в горных выработках различного типа требуется разработка разных способов нормализации микроклиматических условий для каждого из типов.

Полученные результаты исследований являются основой разработки мероприятий по нормализации температур воздуха в различных группах горных выработок глубоких рудников с учетом основных влияющих факторов.

2.5. Выводы

В результате проведенных исследований процессов формирования теплового режима глубоких рудников можно сделать следующие выводы:

- в установившихся штатных режимах проветривания распределение температуры воздуха в воздухоподающих и вентиляционных стволах определяется процессом адиабатического сжатия или расширения и в наибольшей степени зависит от начальных термодинамических параметров воздуха, и описывается законом, близким к линейному;
- на формирование температуры воздуха в подземных рабочих зонах значительное локальное влияние оказывают местные источники тепловыделения, такие как дизельные и электрические приводы транспортных и погрузочно-доставочных горных машин;
- в пределах очистных горизонтов значительное влияние на температуру стенок горных выработок оказывают тепловыделения при твердении закладочных массивов, учет которых необходим при расчете теплового режима горных выработок глубоких рудников;

- наличие фазовых переходов конденсации влаги в атмосфере горных выработок оказывает значительное влияние на формирование температурного поля воздушной струи и должно учитываться при моделировании процессов теплораспределения;
- на интенсивность процесса теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород, определяющего тепловой режим горных выработок, наряду с их теплофизическими свойствами оказывают влияние геометрические параметры горных выработок и аэродинамические характеристики воздушного потока.

Разработанные численные алгоритмы моделирования термодинамических процессов в горных выработках и породных массивах позволяют рассчитывать тепловой режим глубоких шахт и рудников, в том числе, при применении мероприятий его регулирования.

Разработанная классификация горных выработок по факторам формирования теплового режима позволяет реализовать дифференцированный подход к разработке способов нормализации микроклиматических условий с учетом действующих факторов формирования теплового режима.

3. ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА В ГЛАВНЫХ ВОЗДУХОПОДАЮЩИХ ВЫРАБОТКАХ

3.1. Исследование эффективности поверхностных систем кондиционирования воздуха

Использование поверхностных систем кондиционирования воздуха, расположенных на промышленной площадке и обеспечивающих обработку воздуха перед его подачей в воздухоподающие стволы, обладает следующими преимуществами:

- общепромышленное исполнение оборудования, значительно более дешевое и простое в обслуживании, чем оборудование рудничного исполнения;
- отсутствие стесненных условий на земной поверхности и необходимости более компактного изготовления и размещения оборудования, что также приводит к снижению стоимости системы;
- повышение безопасности ведения подземных горных работ за счет отсутствия в горных выработках оборудования систем кондиционирования воздуха и исключение рисков, связанных с ним аварий;
- поверхностное размещение холодильной машины и градирни позволяет задействовать естественные источники холода, такие как климатические условия холодного периода года, поверхностные и подземные воды, что значительно снижает эксплуатационные затраты на работу холодильных машин.

В данном разделе работы выполняется исследование эффективности поверхностных систем кондиционирования воздуха и определяются границы их применимости для нормализации микроклиматических условий в подземной части рудника.

После обработки воздуха в поверхностной системе кондиционирования воздуха и при его дальнейшем опускании по воздухоподающим стволам температура воздушного потока меняется за счет гидростатического сжатия и нагрева воздуха и за счет его теплообмена с окружающим породным массивом. На рисунке 3.1 представлены результаты расчета распределения температуры по стволу диаметром 8 метров, при подаче по нему $300 \text{ м}^3/\text{с}$ воздуха с начальной температурой $+5 \text{ }^\circ\text{C}$. Для сравнения также представлено распределение температуры, формирующееся только за счет гидростатического сжатия и нагрева воздуха при его опускании. Наглядно видно, что уже через час после начала проветривания фактор теплообмена практически не влияет на теплораспределение воздуха в стволе — на основном участке ствола график не отличается от расчета, учитывающего только гидростатический нагрев воздуха, без теплообмена. И дальней-

шая подача воздуха приводит к еще большему снижению влияния теплообмена на температуру рудничного воздуха.

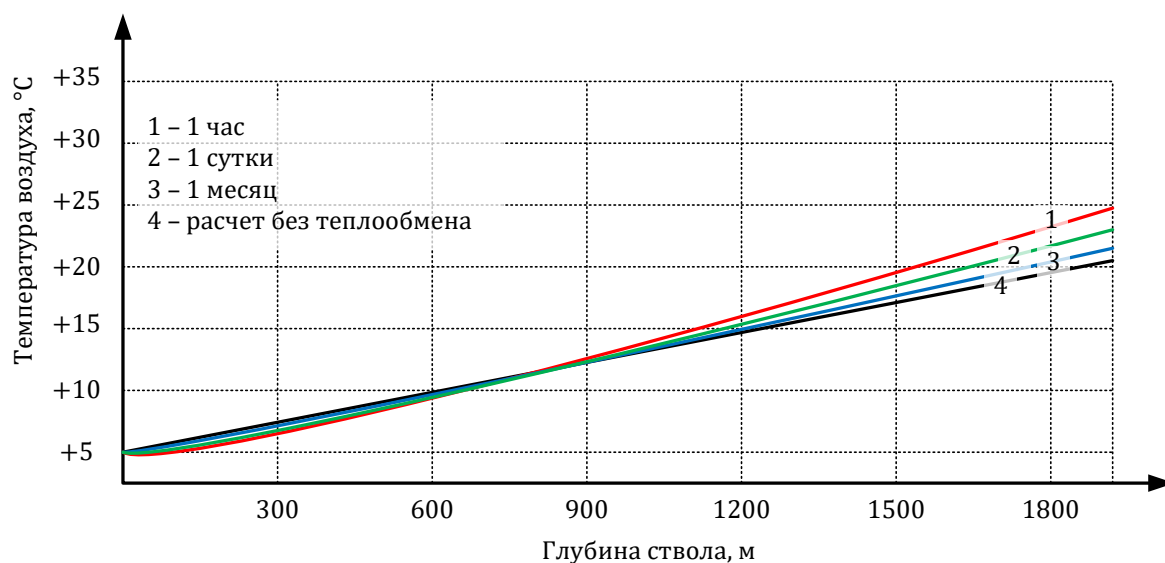


Рисунок 3.1 — Распределение температуры воздуха по глубине ствола при расчете с учетом и без учета теплообмена воздуха с горными породами

Физически данное явление объясняется следующим образом. В процессе теплообмена происходит охлаждение приконтурной части окружающего массива горных пород. В штатном режиме проветривания, когда по стволу в течение продолжительного времени подается большое количество воздуха, и поверхность теплообмена ограничена только стенками ствола, в течение короткого времени (минуты и часы) образуется охлажденная приконтурная зона породного массива, выступающая уже как своего рода теплоизолятор, снижающий интенсивность протекания теплообмена.

Основным фактором, определяющим формирование температурного поля воздуха в стволах, является процесс гидростатического сжатия, исключить влияние которого невозможно. Поэтому единственно возможным решением задачи снижения температуры воздуха, поступающего по стволам на проветривание горизонтов глубоких рудников, является обеспечение минимально возможной температуры воздуха, подаваемого в ствол, за счет использования системы поверхностного охлаждения воздуха. Согласно пункту 155 действующих Федеральных норм и правил «Правила безопасности при ведении горных работ ...» [126] для предотвращения обмерзания горных выработок «Воздух, поступающий в горные выработки, должен иметь температуру не менее +2 градусов». Таким образом, при работе поверхностной системы кондиционирования воздуха минимально возможной температурой воздуха, подаваемой в ствол, является +2 °C.

Рассчитаем варианты теплораспределения в стволе, когда в течение года в рудник подается воздух с постоянной температурой за счет применения системы поверхностного кондиционирования. При этом в зимний период времени воздух, поступающий в шахту, подогревается до температуры $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в летний период времени охлаждается до температуры $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рисунке 3.2 представлены результаты расчета распределения температуры воздуха по глубине воздухоподающего ствола при наличии поверхностной системы кондиционирования, обеспечивающей круглогодичное поддержание одинаковой температуры воздуха, поступающего в ствол, начиная от минимально возможной $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и заканчивая максимально допустимой $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

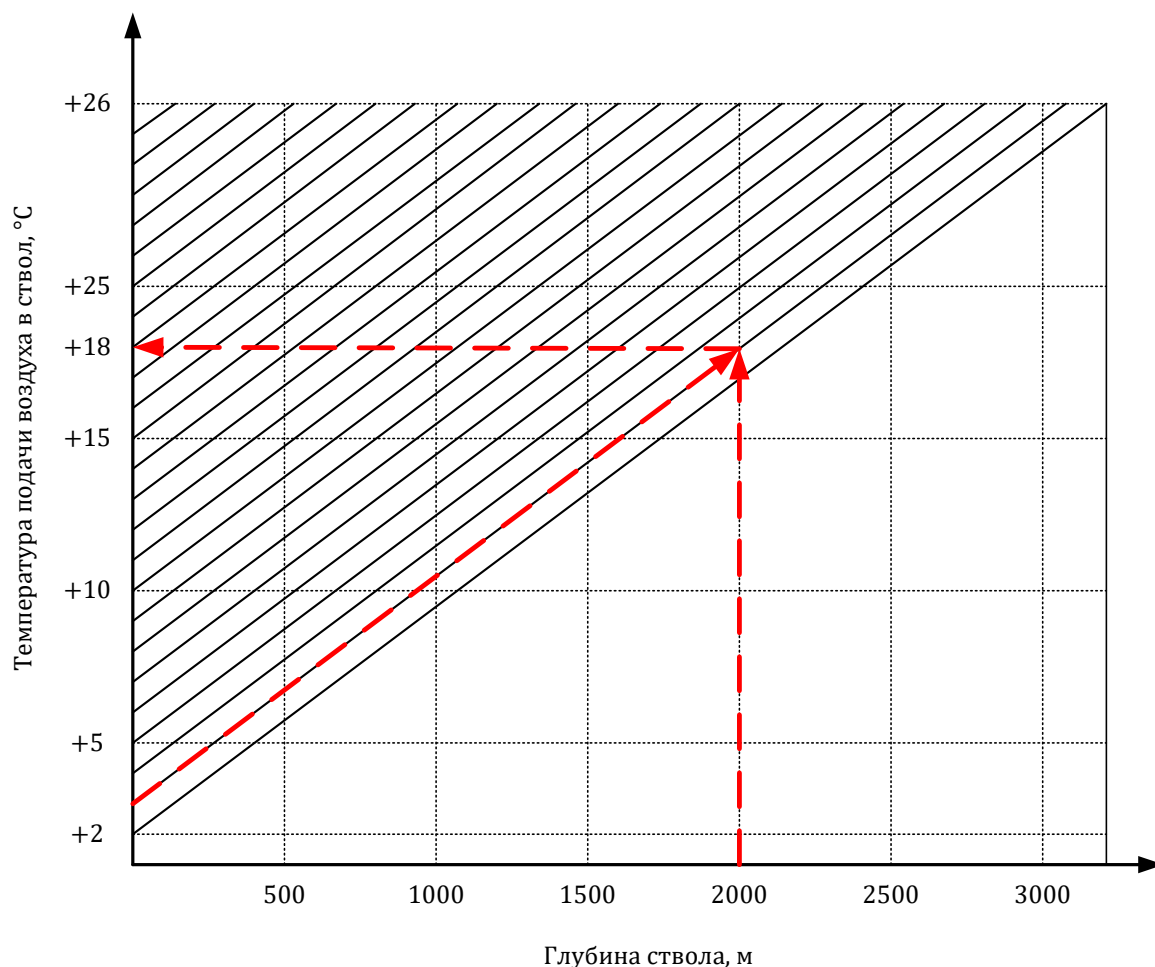


Рисунок 3.2 — Номограмма для расчета температуры воздуха на сопряжении ствола с околоствольным двором при известной глубине и начальной температуре подаваемого воздуха

На основе построенной номограммы можно сделать вывод об ограничении эффективности поверхностного кондиционирования воздуха. Даже если обеспечивать подачу минимально возможной температуры воздуха в ствол $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ при опускании на

глубину 3120 метров его температура повысится до + 26 °С. Именно этим фактом объясняется необходимость внедрения ступенчатых систем охлаждения воздуха на рудниках, где глубина стволов превышает 3 километра.

В то же время, до этих глубин способом поверхностного охлаждения воздуха можно эффективно решать задачу обеспечения требуемых микроклиматических условий в выработках околоствольного двора и на начальных участках главных воздухоподающих выработок. Однако при дальнейшем движении воздуха произойдет его нагревание до температуры окружающего породного массива. Поэтому следующим шагом является исследование области эффективности способа в пределах подземных горных выработок.

Для оценки радиуса эффективности поверхностного охлаждения воздуха произведен расчёт расстояния, на котором температура воздуха достигнет +26 °С, при различных начальных температурах воздуха, подаваемых по стволу, температурах окружающего породного массива и скоростях движения воздуха.

В таблицах 3.1 и 3.2 представлены результаты выполненных расчетов радиуса эффективности поверхностной системы кондиционирования воздуха — расстояния, пройдя которое воздух нагреется до +26 °С по причине теплообмена с окружающим породным массивом.

Таблица 3.1 — Результаты расчета радиуса эффективности поверхностной системы кондиционирования при естественной температуре массива +35 °С

Начальная температура воздуха	Скорость движения воздуха			
	0,5 м/с	1 м/с	1,5 м/с	2 м/с
+10 °С	1102 м	1724 м	2357 м	3036 м
+20 °С	556 м	896 м	1215 м	1514 м

Таблица 3.2 — Результаты расчета радиуса эффективности поверхностной системы кондиционирования при естественной температуре массива +50 °С

Начальная температура воздуха	Скорость движения воздуха			
	0,5 м/с	1 м/с	1,5 м/с	2 м/с
+10 °С	551 м	913 м	1243 м	1504 м
+20 °С	254 м	409 м	545 м	698 м

На основании полученных результатов можно сделать вывод о применимости поверхностного кондиционирования воздуха для нормализации микроклиматических

условий только в пределах выработок околоствольного двора и начальных участков главных воздухоподающих выработок. Как видно из результатов расчетов, радиус эффективности быстро уменьшается при увеличении глубины ствола. Кроме того, радиус сильно зависит от скорости движения воздуха в выработках — при уменьшении скорости по причине, например, распределения расхода воздуха по разветвленной сети выработок околоствольного двора, воздушный поток интенсивно нагревается и эффективность работы системы падает.

Еще одним важным аспектом, требующим исследования, является определение наиболее эффективной стратегии управления расходом и температурой воздуха, обеспечивающей минимальный нагрев воздушной струи при фиксированной холодильной мощности. Эта задача возникает в связи с тем, что на практике зачастую холодильная мощность поверхностной системы кондиционирования для снижения затрат на строительство рассчитывается не на максимальную температуру и относительную влажность поверхностного воздуха, а на среднюю температуру наиболее теплого месяца. В связи с этим могут возникать ситуации, когда работа поверхностной системы кондиционирования не позволит обеспечивать охлаждение всего объема воздуха до $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае может быть два альтернативных варианта — повышать конечную температуру воздуха при сохранении его расхода, или же снижать расход воздуха с сохранением минимальной температуры.

Для решения задачи выполнено численное моделирование теплораспределения в главной воздухоподающей выработке для различных соотношений расходов и начальных температур воздуха при фиксированной холодильной мощности. Исходные параметры для задачи: воздушная струя двигается по главной воздухоподающей выработке длиной 2500 метров площадью поперечного сечения $12,5\text{ м}^2$, скорость движения воздуха варьируется от 1 м/с до 2 м/с, при этом температура воздуха до охлаждения равна $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, а эффект охлаждения варьируется от $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от расхода, естественная температура массива горных пород $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты расчета представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 — Расчет тепловых потерь и требуемой холодильной мощности при различных соотношениях начальной температуры и расхода воздуха

Начальная температура воздуха	Скорость движения	Конечная температура воздуха	Мощность нагрева воздуха	Требуемая мощность для охлаждения до +26 °С
5 °С	1 м/с	31,5 °С	432 кВт	89 кВт
12,5 °С	1,5 м/с	30 °С	428 кВт	123 кВт
20 °С	2 м/с	30,5 °С	342 кВт	179 кВт

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при ограниченной холодильной мощности поверхностной системы кондиционирования, не позволяющей охлаждать весь объем воздуха до минимальной температуры, более эффективным вариантом является обеспечение минимальной температуры воздуха, нежели максимального объема охлаждаемого воздуха. Физически это связано с тем, что конечная температура воздуха после теплообмена с массивом в главных воздухоподающих выработках слабо зависит от скорости его движения (особенно при больших сроках теплообмена), а требуемая холодильная мощность — сильно.

Повысить эффективность применения системы поверхностного охлаждения и увеличить зону распространения охлажденного воздуха можно за счет более глубокого (ниже +2 °С) охлаждения воздуха на поверхности. Снижение температуры воздуха, подаваемого в рудник, приводит к пропорциональному снижению асимптотического во времени значения температуры воздуха в месте сопряжения ствола с глубокими горизонтами шахт и рудников. Кроме того, снижение минимальной температуры воздуха позволит уменьшить энергопотребление главной калориферной установки в холодный период года. Однако обоснование возможности снижения температуры воздуха, подаваемого в рудник, требует дополнительных исследований обводненности пластов горных пород, пересекаемых стволом, крепи ствола, его эксплуатационной нагрузки и т.д.

Весьма важной деталью является тот факт, что поверхностная система кондиционирования воздуха охлаждает весь объем воздуха, подаваемый в ствол. Это значит, что холодильная мощность системы будет весьма существенной, тем более что расчет такой системы будет производиться на максимальные температуры теплого периода времени года, когда атмосферный воздух имеет высокие значения температуры и относительной влажности.

Таким образом, использование поверхностных систем кондиционирования воздуха без дополнительных технических мероприятий позволяет нормализовать температуру воздуха лишь в районе выработок околоствольных дворов и главных воздухоподающих выработок. В дальнейшем, при распараллеливании движения воздушных потоков в подземной сети выработок, увеличении поверхности и времени теплообмена рудничный воздух быстро принимает температуру окружающих горных пород. Даже в том случае, когда при помощи поверхностной системы охлаждения воздуха удастся обеспечить требуемое охлаждение воздуха в подземных рабочих зонах, использование теплового потенциала воздушной струи и средств систем воздухоохлаждения является не эффективным в силу интенсивного нагрева рудничного воздуха, поступающего на проветривание.

Поэтому для эффективного охлаждения воздуха непосредственно в очистных и подготовительных выработках, а также их забоев, необходима разработка дополнительных технических мероприятий, направленных на уменьшение нагрева воздуха при его дальнейшем движении по воздухоподающим выработкам горизонтов.

3.2. Способы уменьшения нагрева воздуха в главных воздухоподающих выработках

3.2.1. Оптимизация размеров выработок

Проветривание камер служебного назначения требует значительно меньше воздуха, чем проветривание очистных и подготовительных рабочих зон. Поэтому традиционная схема вентиляции, предполагающая подачу всего количества воздуха в выработки околоствольного двора, является нецелесообразной. Для того, чтобы минимизировать потери холода при его движении по подземной сети горных выработок, требуется осуществлять контроль его подачи в камеры служебного назначения околоствольного двора. Оставшуюся часть воздуха для проветривания очистных и подготовительных подземных рабочих зон целесообразно подавать по воздухоподающим выработкам, площадь поперечного сечения, форма и расход воздуха по которым подбирается из расчета обеспечения минимального нагрева струи.

Ограниченная площадь поверхности теплообмена в воздухоподающей горной выработке и значительный объем подаваемого по ней воздуха способствуют быстрому формированию приконтурной зоны охлажденных горных пород и снижению интенсивности процесса теплообмена. На рисунке 3.3 приведены результаты моделирования распределения температуры воздуха в воздухоподающей выработке, расположенной в

пределах горизонта очистных работ на глубине 1400 метров (естественная температура пород +45 °С).

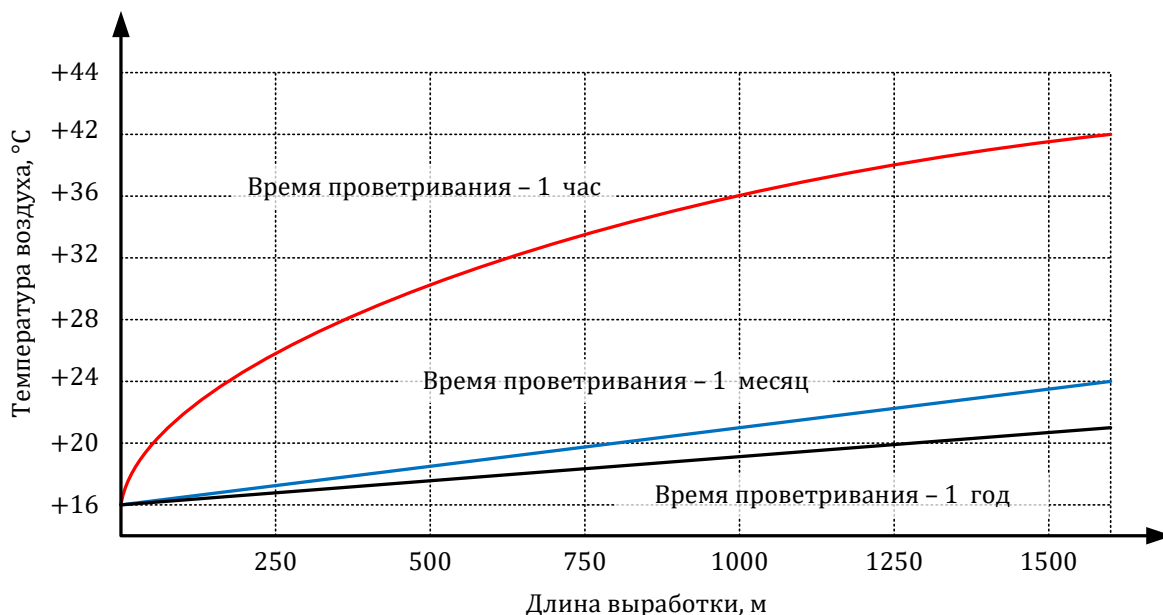


Рисунок 3.3 — Распределение температуры воздуха в одиночной воздухоподающей выработке при естественной температуре пород +45 °С на глубине 1400 метров спустя 1 месяц после начала проветривания

Требуется решения вопрос определения оптимального радиуса воздухоподающих выработок и скорости движения воздушной среды таким образом, чтобы тепловыравнивающий слой в породном массиве формировался в кратчайшие сроки и минимизировал конечное нагревание воздушной среды. В тоже время, необходимо учитывать, что при увеличении расхода воздуха, значительно возрастает аэродинамическая мощность, требуемая для поддержания этого расхода.

Для решения задачи проведено моделирование ряда вариантов подачи воздуха, отличающихся скоростью движения воздуха и площадью поперечного сечения горной выработки при постоянных расходах 50 м³/с и 100 м³/с воздуха по выработке длиной 2000 метров с температурой окружающего массива горных пород +40 °С.

Тепловые потери энергии рассчитываются при помощи выражения

$$E_Q = \rho_a \cdot c_a \cdot Q \cdot \Delta T, \quad (3.1)$$

где ρ_a — плотность воздуха, кг/м³;

c_a — удельная массовая теплоемкость воздуха, кг/м³;

Q — расход воздуха в выработке, м³/с;

ΔT — суммарная разница температур воздуха в начале и в конце выработки, °С.

Количество энергии, расходуемое на поддержание движения воздуха через выработку в единицу времени, определяется при помощи выражения [88]

$$E_R = 9,81 \cdot R \cdot Q^3, \quad (3.2)$$

где R — аэродинамическое сопротивление горной выработке, кмюрг.

Полученные результаты представлены на рисунках 3.4 и 3.5.

Как видно из полученных результатов, существует оптимальное сочетание радиуса воздухоподающих выработок и расходов воздуха по ним, обеспечивающее минимальные суммарные затраты на поддержание расхода (преодоления ее аэродинамического сопротивления) и тепловые потери в окружающий породный массив. В рассмотренных вариантах оптимальный радиус выработок равен 2,5 и 2 метрам соответственно, а скорости движения воздуха 5,1 м/с и 3,98 м/с соответственно. Как видно, с возрастанием расхода воздуха увеличиваются оптимальные значения радиуса выработки и скорости движения воздуха.

В общем случае оптимальные параметры главных воздухоподающих выработок определяются индивидуально с учетом общего расхода воздуха, подаваемого по ним, и теплофизических параметров массива. Задача поиска оптимального радиуса ставится следующим образом. Минимизируется следующий функционал, равный сумме тепловых и аэродинамических потерь во всей системе выработок:

$$\sum_{i=1}^N (R_i \cdot Q_i^3 + Q_i \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot \Delta T_i) \rightarrow \min, \quad (3.3)$$

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

R_i — аэродинамическое сопротивление выработки (кмюрг);

Q_i — расход воздуха, подаваемый по выработкам ($\text{м}^3/\text{с}$);

c_a — удельная массовая теплоемкость воздуха ($\text{Дж}/^\circ\text{С}\cdot\text{кг}$);

ρ_a — плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$);

ΔT_i — разница температур между начальной температурой воздуха, поступающей на проветривание горизонта, и конечной, поступающей на проветривание подземных рабочих зон.

В выражении (3.3) результирующая разница температур воздуха $\Delta T(r, t)$ и аэродинамическое сопротивление $R(r)$ являются функциями, зависящими от радиуса выработки и формы поперечного сечения. Оптимизируемым параметром является радиус выработок. Его оптимальным значением является такое, при котором обеспечивается минимум представленного функционала.

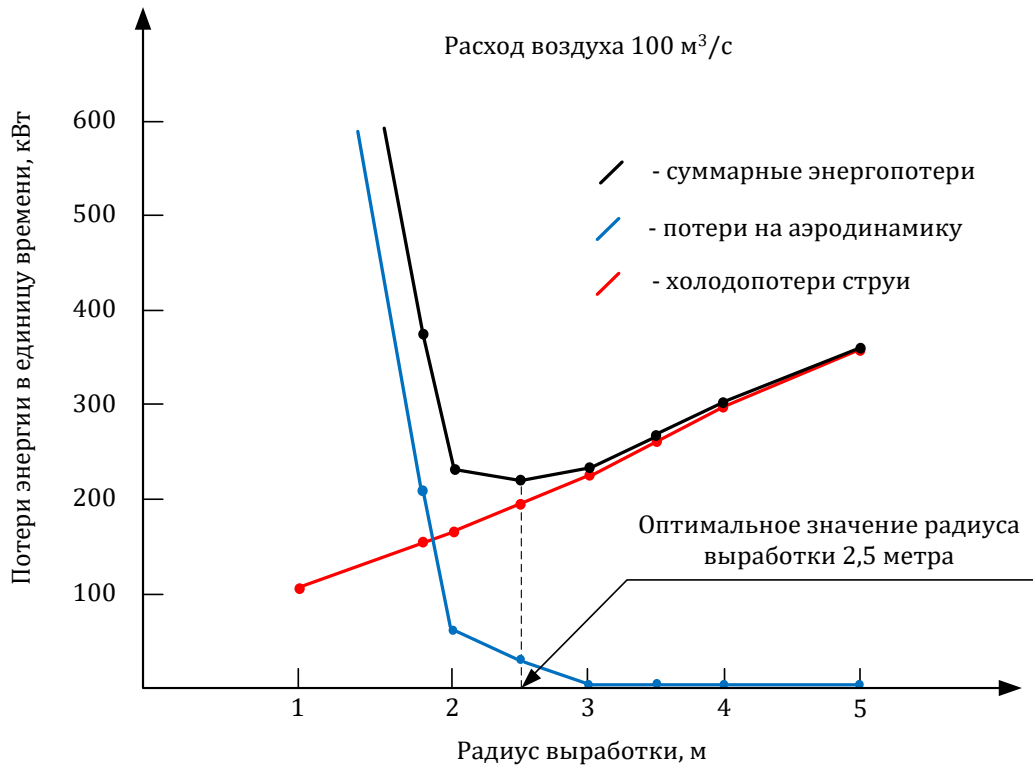


Рисунок 3.4 — Решение задачи оптимизации радиуса выработки при расходе 100 м³/с

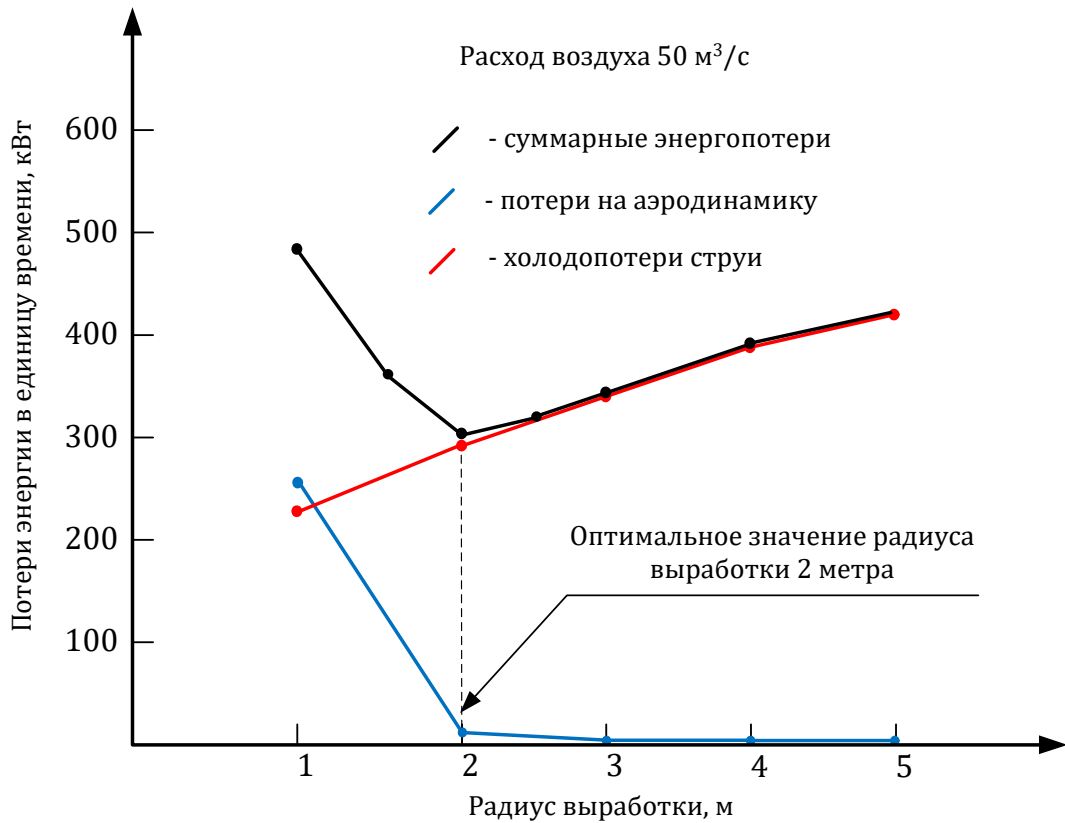


Рисунок 3.5 — Решение задачи оптимизации радиуса выработки при расходе 50 м³/с

3.2.2. Оптимизация параметров теплоизоляции стенок выработок

Для минимизации теплового взаимодействия породного массива с рудничным воздухом, исключению нагревания воздушной струи из-за процессов окисления руд, воздухоподающие выработки могут быть закреплены набрызг-бетонной изолирующей теплозащитной крепью на основе специальных теплоизоляционных марок бетона.

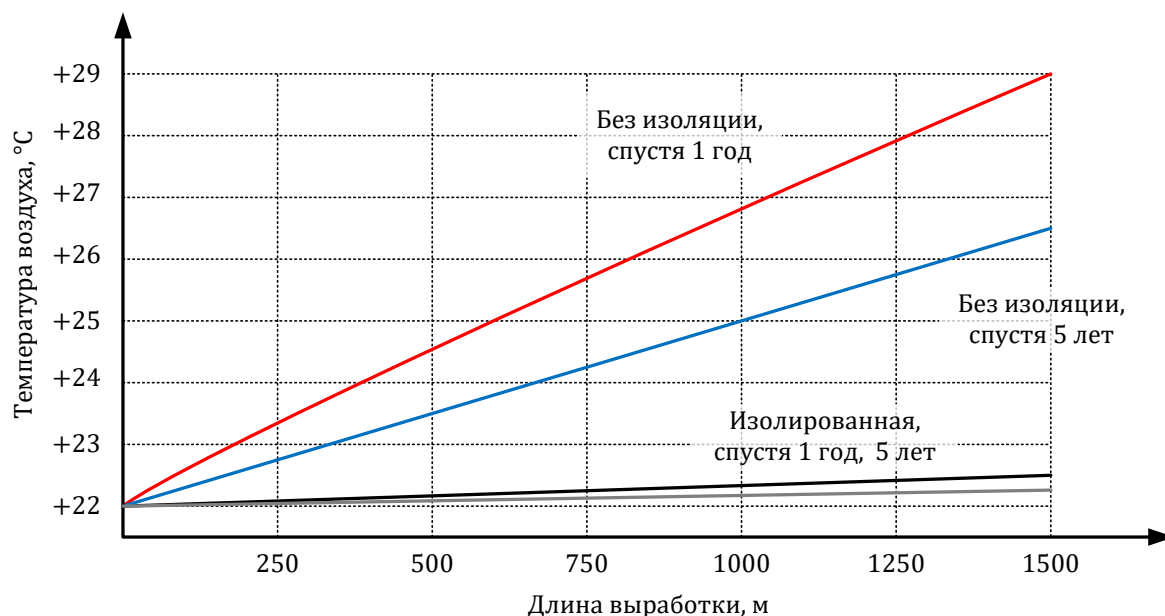


Рисунок 3.6 — Распределение температуры воздуха по длине одиночной выработки в течение различных периодов ее эксплуатации без и при использовании теплоизоляции

Наряду с его эффективностью данное мероприятие является достаточно трудо- и материально- затратным. Поэтому становится важным определение оптимального распределения параметров крепления в зависимости от длины горной выработки. Распределение толщины теплоизоляционного слоя нужно производить так, чтобы при одинаковом затраченном объеме бетона обеспечивалось минимальное нагревание воздушного потока.

Для определения принципа оптимального нанесения теплоизоляционной крепи с теплофизической точки зрения были промоделированы различные варианты нагрева воздуха при его движении по горной выработке, различным образом закрепленной набрызг-бетонной крепью. Сравнивались различные варианты: отсутствие теплоизоляционного покрытия, его равномерное и неравномерное нанесение. Теплофизические условия для расчета приняты следующими: начальная температура воздуха 16 °C, естественная температура породного массива 45 °C. Теплопроводность горной крепи — 0,2 Вт/м · °C, длина горной выработки — 2500 метров. Всего было промоделировано 4 варианта. Первый вариант — без покрытия, второй вариант — равномерное распределе-

ние покрытия толщиной 20 см по длине выработки, общий объем крепления 50 м³, третий вариант — линейно убывающая толщина покрытия с начальной толщины 40 см, четвертый — линейно возрастающая толщина покрытия с 0 до 40 см. Результаты расчетов приведены на рисунке 3.7.

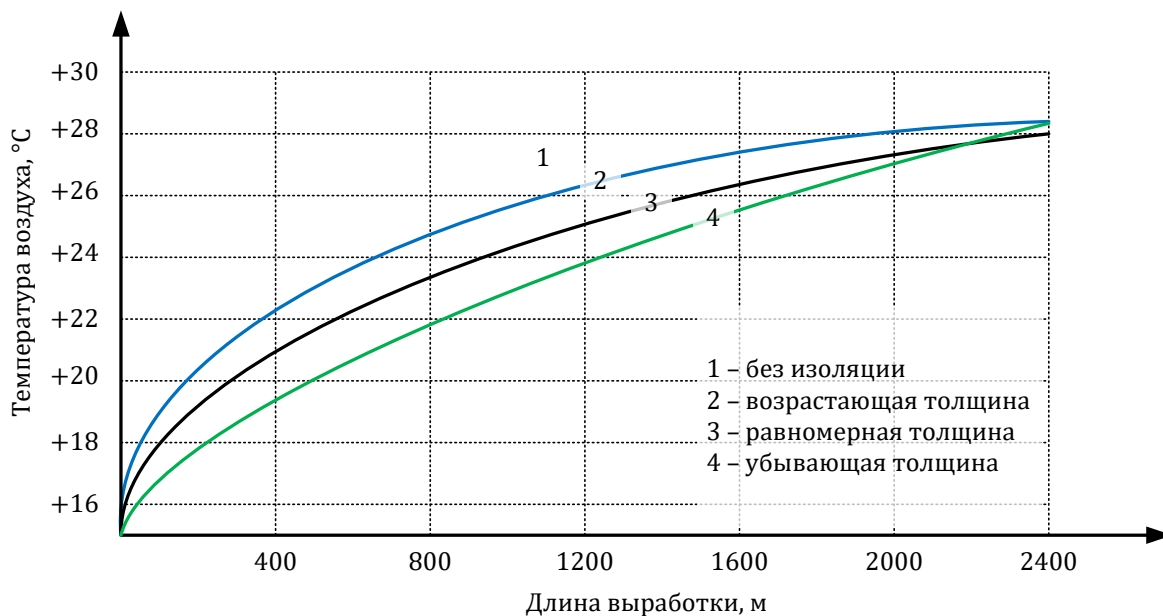


Рисунок 3.7 — Результаты расчета температуры воздуха по длине горной выработки при различных вариантах распределения толщины теплоизоляционного слоя

Из рисунка видно, что при малых длинах выработки (до 1500 метров) наиболее целесообразным является убывающий характер нанесения крепи, в таком случае на участках с наибольшим температурным напором между воздухом и породами обеспечивается максимальная теплоизоляция. При больших длинах выработки (свыше 1500 метров) наиболее целесообразным является нанесение крепи с толщиной, возрастающей по длине, поскольку на начальных участках длины выработки образуется приконтурная зона охлажденных пород, позволяющая обеспечивать подачу не нагретого воздуха до теплоизолированных участков, в которых, в свою очередь, нагрев воздушной струи становится менее интенсивным.

Наиболее предпочтительным является неравномерное крепление горных выработок в зависимости от их длины, позволяющее при одинаковых материальных затратах на крепление добиваться минимального нагрева вентиляционной струи при движении в условиях высоких температур окружающих горных пород.

На сегодняшний день существует большой класс материалов, которые наряду с низкой теплопроводностью обладают достаточно высокими прочностными свойствами. К ним относятся легкие ячеистые пеногазобетоны на основе вермикулита, керамзита,

шлака, диатомита, аглопорита, а также полимерные материалы, которые при добавлении соответствующих заполнителей приобретают прочность, сравнимую с прочностью обычного бетона.

Таким образом, кроме теплоизоляционных свойств, теплозащитные набрызг-бетонные покрытия обладают следующими полезными свойствами:

- выполняют несущую функцию в качестве горной крепи, позволяя горной выработке сохранять эксплуатационные свойства;
- легко сооружаются технологически;
- при набрызге раствор бетона глубоко проникает в трещины, скрепляя породу по контуру выработки и тем самым увеличивая ее несущую способность;
- хорошая адгезия бетона к горной породе будет способствовать образованию единой системы «порода — теплозащитная крепь», которая обладает более высокой несущей способностью по сравнению с суммой несущих способностей каждого из элементов системы [36].

В качестве наполнителей набрызг-бетона могут использоваться применяемые для обычных легких и теплозащитных бетонов материалы: керамзит, шлаки, перлит и другие. В ИГДС СО РАН разработаны составы теплозащитных набрызг-бетонов для различных горных предприятий с использованием легких наполнителей местного производства. Для рудников ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» — азерита. В таблице 3.4 приведены рекомендуемые составы и свойства набрызг-бетонов с заполнителями из искусственного теплоизоляционного материала азерита (аналог керамзита, выпускается в г. Норильске), целесообразного для использования в глубоких рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

Таблица 3.4 — Рекомендуемые составы теплоизоляционных бетонов с различными типами наполнителей (по данным Васильева П.Н., Курилко А.С. и др. [109])

Показатели	Смеси		
Азеритобетон			
Объемные соотношения цемент: азерит	1:2	1:3	1:4
Расход цемента на 1 м ³ бетона, кг	550	370	300
Расход азерита на 1 м ³ бетона, кг	840	840	880
Расход воды на 1 м ³ бетона, кг	220	170	150
Объемная плотность готового бетона	1500	1440	1870
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	0,6	0,48	0,4
Вермикулитобетон			

Показатели	Смеси		
Объемные соотношения цемент: вермикулит	1:2	1:3	1:4
Расход цемента на 1 м ³ бетона, кг	660	470	365
Расход вермикулита на 1 м ³ бетона, кг	150	160	165
Расход воды на 1 м ³ бетона, кг	490	480	470
Объемная плотность сухого бетона, кг/м ³	970	750	620
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	0,3	0,22	0,2
Пеносиликатобетон			
Объемные соотношения цемент: дробленый пеносиликат	1:4	1:4	1:5
Соотношения воды и цемента	1:5	1:4	1:5
Объемная плотность бетонного раствора, кг/м ³	1360	1220	910
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	0,28	0,24	0,21

Важно отметить, что толщина набрызг-бетонной крепи должна определяться, помимо условия обеспечения теплоизоляции, также и с геомеханической точки зрения для обеспечения эксплуатационных параметров выработки [64]. Геомеханически определяется минимальная толщина нанесения крепи, обеспечивающая сохранение эксплуатационных свойств горной выработки, которую необходимо учитывать при окончательном выборе параметров крепления.

Дополнительно проведено исследование эффективности теплоизоляции поверхности горных выработок в случае наличия сезонных колебаний температуры воздуха, поступающего в рудник. Для этого проведено численное моделирование теплораспределения в закрепленных выработках и окружающем их породном массиве при следующих параметрах: расчет производился для горной выработки длиной 1000 м и поперечным сечением 20 м²; значение температуры воздуха, поступающего на проветривание +40 °С; температура породного массива +30 °С; расход воздуха 20 м³/с.

Наглядно распределение температуры воздуха с учетом применения теплоизоляционного покрытия стенок горной выработки представлено на рисунке 3.8.

По результатам моделирования выявлено, что в теплый период года за счет сезонного изменения температуры наружного воздуха и его гидростатического сжатия температура воздуха превышает температуру породного массива. Таким образом, теплоизоляционная крепь стенок горных выработок приводит к снижению передачи воздухом теплоты боковым породам, поэтому температура воздуха, поступающего на проветривание рабочих зон, искусственно увеличивается.

В холодный период года происходит обратное — увеличение термического сопротивления стенок воздухоподающих выработок посредством их крепления позволяет незначительно уменьшить теплоприток в рудничную атмосферу из высокотемпературного массива. При этом температура воздуха во всех рабочих зонах, кроме камер служебного назначения, превышает предельно допустимую.

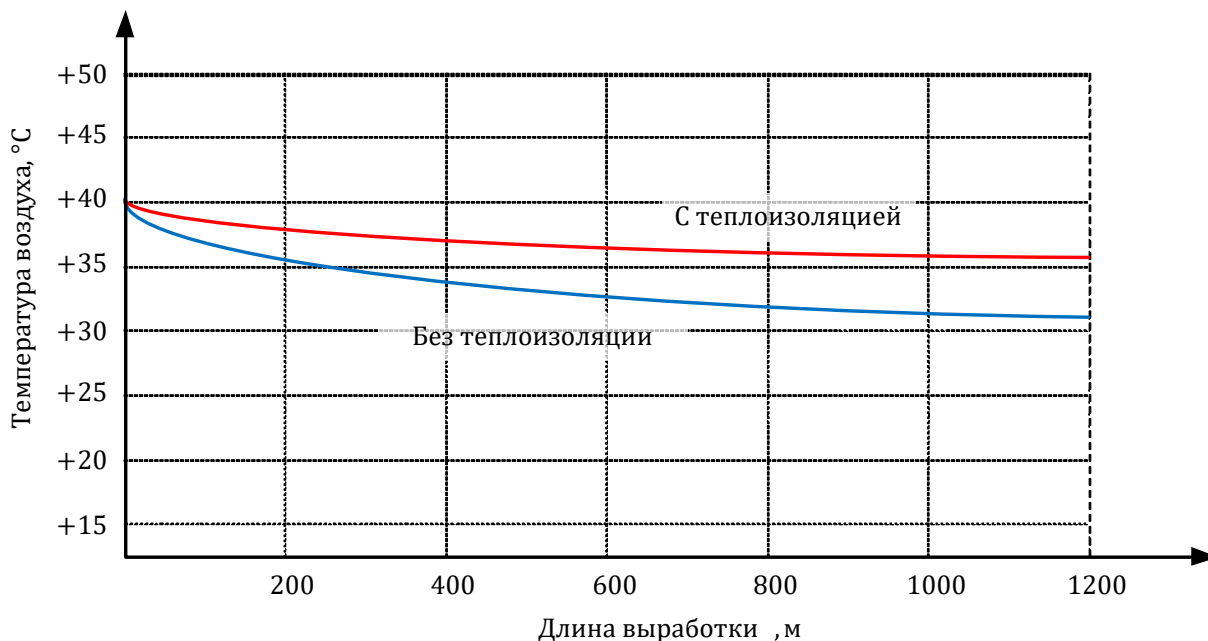


Рисунок 3.8 — Распределение температуры воздуха в горной выработке для теплого периода года с учетом применения теплоизоляции стенок выработки

Выполненные расчёты выявили, что теплоизоляция стенок воздухоподающих выработок при отсутствии системы охлаждения воздуха на поверхности является нецелесообразным техническим решением.

3.3. Перспективы использования систем автоматического управления проветриванием для регулирования теплового режима

Наиболее эффективные и надежные системы вентиляции шахт и рудников строятся на базе систем автоматического управления проветриванием. На сегодняшний день разработка систем автоматического управления проветриванием имеет следующие концептуальные направленности:

- повышение оперативности контроля и управления проветриванием подземных рабочих зон и, соответственно, повышение безопасности ведения горных работ;
- снижение энергетических затрат на обеспечение вентиляции рудника.

Разработке теоретических и технических основ построения систем автоматического управления проветриванием (САУП) посвящены работы Абрамова Ф.А. [1], Пучкова Л.А. [2], Цоя С.В. [3], Казакова Б.П., Круглова Ю.В., Левина Л.Ю. [4,5]. В цикле

представленных работ доказано, что наиболее эффективные и надежные системы вентиляции шахт и рудников разрабатываются на базе систем автоматического управления. В последнее время разработка систем автоматического управления проветриванием имеет концептуальную направленность на повышение оперативности контроля и управления проветриванием подземных рабочих зон и, соответственно, на повышение безопасности ведения горных работ с одновременным снижением энергетических затрат на обеспечение вентиляции рудника.

На сегодняшний день разработаны и апробированы на практике горных работ технические средства систем автоматического управления проветриванием — вентиляторные установки с одно- и двухпараметрическим регулированием производительности, системы частичного повторного использования воздуха, автоматические вентиляционные двери. Построена теория и алгоритмическая база, разработаны соответствующие программные модули, позволяющие регулировать работу элементов САУП и обеспечивать оптимальные режимы проветривания, характеризующиеся такими параметрами работы средств управления вентиляцией, что все рабочие зоны рудника получают необходимое количество воздуха при одновременной минимизации мощности, потребляемой вентиляторными установками вентиляционной сети [5].

Несмотря на то, что средства САУП обладают широкими возможностями управления аэродинамическими характеристиками движения воздушных потоков в горных выработках, до сегодняшнего не рассматривалась возможность использования средств САУП для улучшения микроклиматических параметров рудничного воздуха. В то же время имеется непосредственная зависимость между аэродинамическими параметрами вентиляции и формированием микроклиматических параметров рудничной атмосферы [6,7]. В статьях на двух отдельных примерах рассмотрено применение средств и возможностей САУП для управления термодинамическими процессами в атмосфере шахт и рудников, и нормализации микроклиматических параметров в горных выработках.

При использовании САУП в целях перераспределения воздушных потоков целесообразна временная интенсификация проветривания проходческих участков, характеризующихся худшими микроклиматическими условиями. При этом происходит увеличение затрат на вентиляцию, но исключаются значительные капитальные и эксплуатационные затраты, связанные с реализацией теплотехнических мероприятий по регулированию теплового режима. Далее, после первичных процессов растепления окружающего породного массива вновь пройденных выработок, возможно снижение подачи воздуха до расчетных величин.

Специфика теплообменных процессов между рудничным воздухом и нагретым породным массивом такова, что от объема подаваемого воздуха и скорости его движения существенным образом зависит результирующее поле температур [9]. В качестве примера на рисунке 3.9 приведены графики распределения температуры воздуха по длине выработки спустя месяц после начала проветривания. Чем выше скорость движения воздуха, тем ниже результирующая температура воздуха, но выше затраты на вентиляцию выработки.

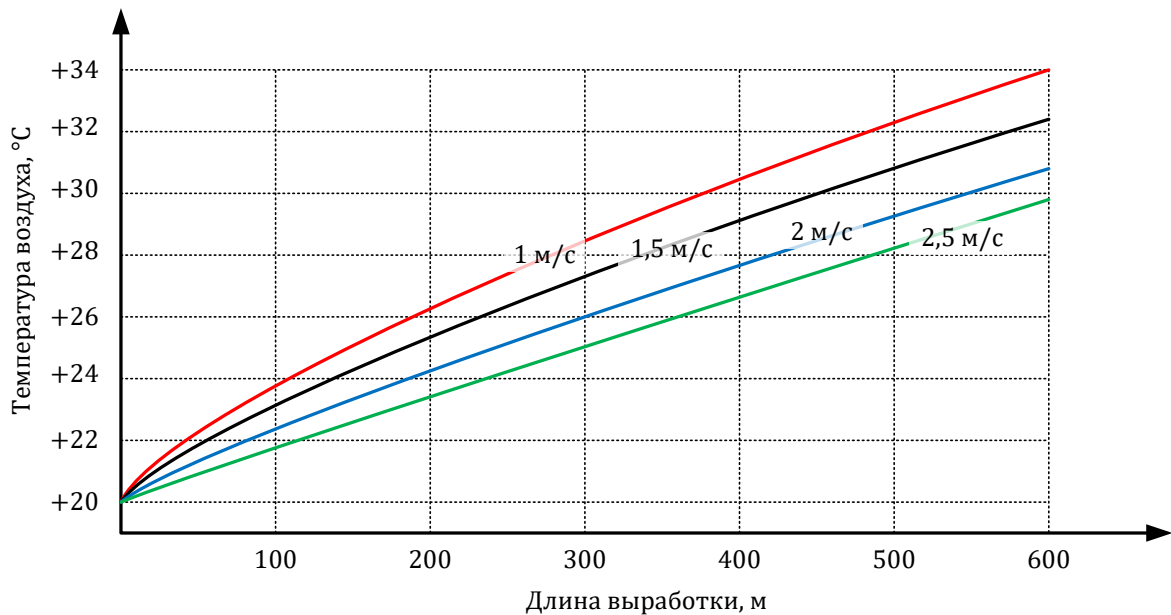


Рисунок 3.9 — Графики распределения температуры воздуха в выработке при различных скоростях движения воздуха спустя сутки после начала проветривания

Осуществить описанный принцип совместного решения задачи управления проветриванием и регулирования микроклиматических параметров можно, перезаписав систему управляющих уравнений САУП в следующем виде

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \gamma \cdot \max_i(Q_i^* - Q_i) - \gamma \cdot \min_i(Q_i - Q_i^*) - \delta \cdot \min_i(\varphi_i) + \zeta \\ &\quad \cdot \max_i(T_i^* - T_i) - \zeta \cdot \min_i(T_i - T_i^*), \\ \frac{d\varphi_i}{dt} &= \lambda \cdot \min_i(Q_i - Q_i^*) + \mu \cdot \min_i(T_i - T_i^*), \end{aligned} \quad (3.4)$$

где n — частота вращения рабочего колеса вентиляторной установки, об/мин;

φ_i — угол положения i -ого регулятора, радиан;

$\gamma, \delta, \lambda, \zeta, \mu$ — коэффициенты интенсивности управления;

Q_i^* — требуемый расход на i -ом регуляторе, м³/с;

Q_i — текущий расход на i -ом регуляторе, м³/с;

$\max(x_i)$ и $\min_i(x_i)$ — функции, возвращающие соответственно максимальные и минимальные значения из множества x_i .

Дополнительные слагаемые в управляющих уравнениях вентилятора и регуляторов содержат требуемую и текущую температуру воздуха, и обеспечивают увеличение подачи воздуха при превышении в рабочей зоне максимально установленного значения температуры. И, наоборот, снижают подачу, если температура воздуха в рабочей зоне становится ниже максимально установленного значения, тем самым решая задачу энергосбережения.

При наличии двух и более параллельных выработок для подачи воздуха на горизонт на начальных стадиях проветривания целесообразно максимальным образом обеспечить подачу воздуха по одной из выработок для формирования приконтурной зоны охлажденных пород, позволяющей осуществить доведение ненагретого воздуха до выработок горизонта.

В то же время, обеспечение неравномерного распределения воздуха приводит к дополнительным энергетическим затратам, что очевидно при применении дополнительных источников тяги. При отрицательном регулировании, предполагающем увеличение сопротивления параллельных участков вентиляционной сети, всегда увеличивается общее аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети, что приводит к возрастанию нагрузки и потребляемой энергии на главной вентиляторной установке. Поэтому в дальнейшем, при формировании достаточной приконтурной зоны, обеспечивающей доведение воздуха до приемлемой температуры, распределение воздуха по горным выработкам выравнивается для снижения депрессии всего участка и нагрузки на главные вентиляторные установки рудника.

Таким образом, наиболее эффективное горнотехническое регулирование теплового режима возможно осуществлять с помощью систем автоматического управления проветриванием. При этом сохраняется основная функция САУП — формирование и контроль требуемого воздухораспределения в горных выработках при обеспечении минимальных энергетических затрат на вентиляторных установках рудника.

3.4. Выводы

В результате проведенных исследований, направленных на разработку способов нормализации микроклиматических параметров воздуха в околоствольных дворах и главных воздухоподающих выработках, можно сделать следующие выводы:

- эффективность использования поверхностных охлаждающих установок для снижения температуры воздуха в выработках околоствольного двора ограничена в зависимости от условий глубиной 1500-2500 метров (при существующих нормативных требованиях);
- при ограниченной холодильной мощности поверхностной системы кондиционирования, не позволяющей охлаждать весь подаваемый в рудник объем воздуха до минимальной температуры, наибольший эффект охлаждения в горных выработках обеспечивается поддержанием минимальной температуры струи, нежели максимального объема охлаждаемого воздуха;
- использование воздухоподающих горных выработок со специально подобранными геометрическими параметрами, параметрами теплоизоляции и расходами воздуха, позволяет минимизировать потери холода при движении воздуха от стволов до подземных рабочих зон очистных и подготовительных горных выработок;
- применение теплоизоляции горных выработок может быть неэффективным в те периоды времени, когда начальная температура воздуха больше температуры окружающего породного массива. К таким случаям относятся рудники, работающие без систем поверхностного кондиционирования воздуха в условиях теплого климата в переходном интервале глубин;
- управление воздухораспределением с целью формирования значительной диспропорции подачи воздуха по воздухоподающим выработкам позволяет уменьшить сроки формирования охлажденной зоны приконтурного массива пород и тем самым увеличить расстояние подачи охлажденного воздуха.

Полученные результаты позволяют обеспечить минимальный нагрев воздушной струи при ее движении до участков ведения подготовительных и очистных работ. Но наибольший нагрев воздуха происходит непосредственно в рабочих зонах, поэтому необходима разработка ресурсосберегающих способов нормализации микроклиматических условий в подготовительных и очистных горных выработках.

Разработке принципиально нового горнотехнического способа, основанного на рециркуляционном проветривании и применимого в переходном интервале глубин, посвящена следующая глава. Разработка теплотехнических способов нормализации микроклиматических условий в подготовительных и очистных горных выработках с использованием подземных систем кондиционирования воздуха выполнена в главе 6.

4. НОРМАЛИЗАЦИЯ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПОДЗЕМНЫХ РАБОЧИХ ЗОНАХ НА ОСНОВЕ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

Применение рециркуляции воздуха в системах вентиляции шахт и рудников является мощным резервом для увеличения эффективности проветривания подземных рабочих зон, снижения капитальных и эксплуатационных затрат при эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Практика использования рециркуляции в пределах отдельных рабочих зон и в общешахтных схемах проветривания широко распространена за рубежом [216]. В отечественной практике системы рециркуляции широко применяются в калийных рудниках. Однако и на рудниках других типов были и есть примеры организации рециркуляционных схем проветривания. Например, локальные системы рециркуляции использовались на шахтах объединения «Северовостокзолото». На основании опытных исследований были разработаны так называемые комбинированные схемы проветривания частично повторным использованием воздуха, на которые затем в 1984 году были переведены 68 шахт этого объединения [167]. Широкое распространение локальных рециркуляционных систем вентиляции за рубежом [219] и в России [88,76] объясняется возможностью быстрого увеличения технического резерва по вентиляции рудника без значительных материальных затрат.

Применение систем повторного использования воздуха для управления микроклиматическими параметрами рудничной атмосферы отмечено давно [72,111]. В условиях калийных рудников повторное использование воздуха позволяет решать задачу осушения главных воздухоподающих выработок, где в теплый период года выпадает значительное количество конденсационной влаги.

Интересный факт — впервые рециркуляционное проветривание было применено в угольных шахтах для целей регулирования микроклимата в пределах длинных очистных забоев еще в конце 19-ого века. Суть заключалась в увеличении скорости движения воздуха в лаве [210], и охлаждающий эффект воздушной струи становился сильнее. Однако такие схемы вентиляции носили локальный характер и применялись для отдельных рабочих зон.

В последнее время рециркуляционные системы проветривания рудников с целью регулирования микроклимата используются для подогрева поступающего в рудник воздуха [201,188] (рудники Канады и Англии), а также для повышения эффективности охлаждения воздуха в глубоких рудниках ЮАР [226], где глубина отработки достигает 3600 метров, а температура горных пород при этом достигает +56 °С. Однако в этих

случаях рециркуляционное проветривание рассматривается в качестве средства повышения эффективности теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима.

В этой главе работы выполнено исследование рециркуляционного проветривания как нового горнотехнического способа нормализации микроклиматических параметров воздуха, не подразумевающего применение систем кондиционирования воздуха.

4.1. Исследование эффективности рециркуляционного проветривания для снижения температуры воздуха в рабочих зонах

Идея предлагаемого способа заключается в следующем. Как было установлено, наиболее неблагоприятные микроклиматические условия формируются в рабочих зонах за счет сильного разогрева воздуха от техногенных источников тепловыделения. Результирующую температуру воздуха в рабочей зоне приближенно можно найти по формуле

$$T_w = T_m + \frac{W}{c \cdot \rho \cdot Q}, \quad (4.1)$$

где T_m — температура воздуха, подходящего к рабочей зоне, чаще всего равная естественной температуре массива горных пород из-за теплообмена с воздухом при его движении в выработках околоствольного двора и главных воздухоподающих выработках, °С;

W — мощность источников тепловыделения в рабочей зоне, кВт;

c — удельная объемная теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С;

ρ — плотность воздуха, кг/м³;

Q — расход воздуха в рабочей зоне, м³/с.

При дальнейшем движении вновь происходит охлаждение воздуха до естественной температуры горных пород. Охлажденный воздух, при соблюдении условия возможности его применения по газовому и аэрозольному составу, целесообразно направить на повторное использование, тем самым увеличив интенсивность проветривания рабочей зоны. Идея способа состоит в том, что в исходящей вентиляционной струе избыточные тепловыделения от техногенных источников отводятся в окружающий породный массив, а рециркуляционное проветривание позволяет локально увеличить количество воздуха, подаваемое для ассимиляции новых теплопритоков. Тем самым происходит снижение нагрева воздуха непосредственно в рабочей зоне. На рисунке 4.1

приведена схема, поясняющая механизм работы рециркуляционного проветривания как средства снижения температуры воздуха.

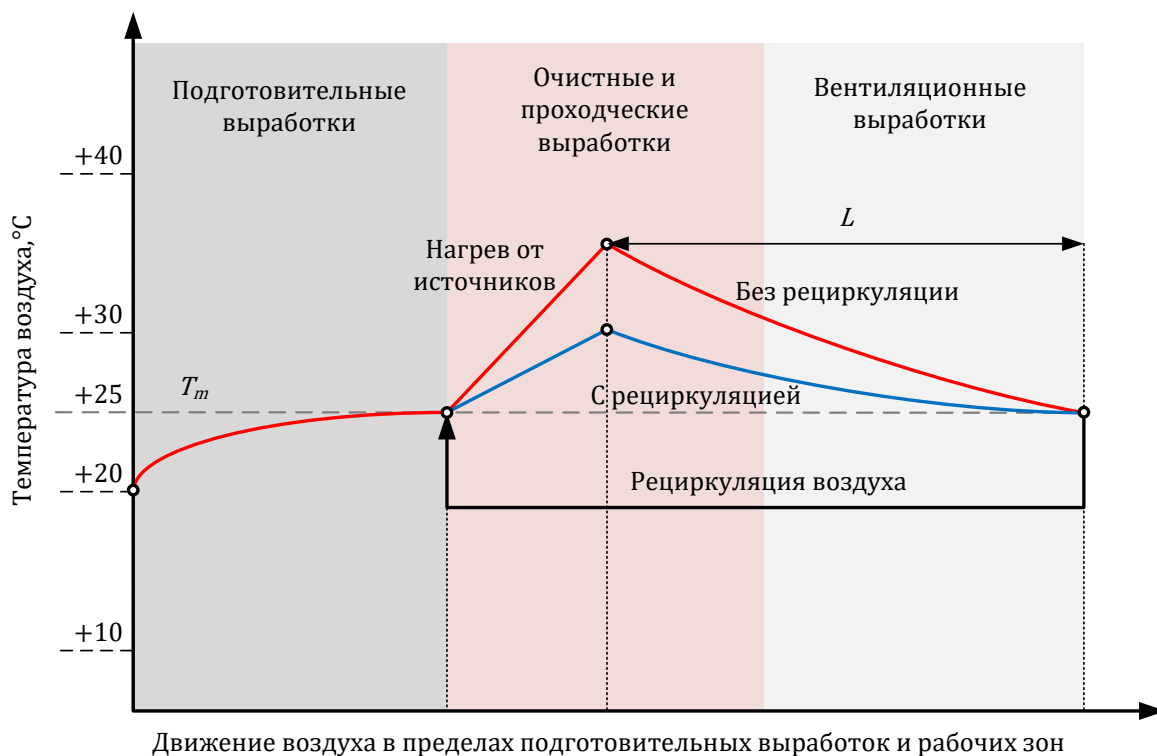


Рисунок 4.1 — Схема к разработке способа нормализации на основе рециркуляционного проветривания

Как видно на схеме для эффективности предложенного способа необходимо наличие двух условий.

Первое — температура массива должна быть меньше допустимой температуры воздуха. В противном случае массив будет в любом случае нагревать воздух до высоких температур и его повторное использование теряет смысл. Именно поэтому предлагаемый способ эффективен в так называемом переходном интервале глубин, когда температура воздуха не превышает $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$, а к формированию неблагоприятных микроклиматических условий приводят преимущественно техногенные источники тепловыделения.

Второе — требуется определенное расстояние, которое необходимо пройти исходящей вентиляционной струе для охлаждения до температуры нетронутого массива горных пород. В противном случае избыточные тепловыделения будут повторно направлены в свежую струю, что приведет к ее нагреванию.

Предложенный способ снижения температуры воздуха на основе рециркуляционного проветривания хорошо применим для условий глубоких калийных рудников. Например, в условиях ОАО «Беларуськалий» несколько рудников ведут работу как раз

в переходном интервале глубин, когда температура горных пород достигает $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$, и уже в силу интенсивных тепловыделений от забойного энергооборудования воздух разогревается до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, калийные рудники имеют протяженные шахтные поля, горные выработки большой длины и центральные схемы проветривания, что позволяет легко реализовывать схемы рециркуляции любого масштаба.

Для дальнейших исследований в теплофизическом модуле АК «АэроСеть» разработана тепловая модель панели № 2 горизонта -440 рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий». На основании данных температурно-влажностной и воздушно-депресссионных съемок произведено ее параметрическое обеспечение и калибровка.

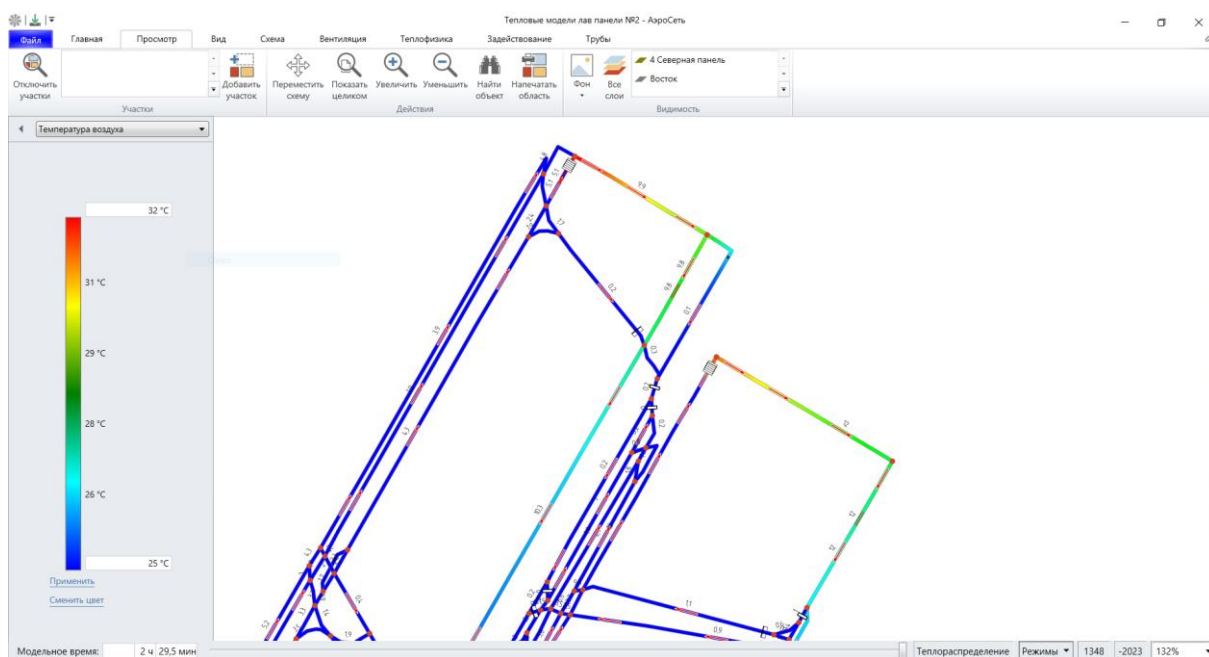


Рисунок 4.2 — Тепловая модель лав панели № 2 горизонта -440 рудника 4 РУ

Отображенная на модели термограмма распределения фактических температур наглядно отображает процесс охлаждения исходящей струи. Максимальная температура воздуха наблюдается на начальном участке лавы, но при дальнейшем движении падает.

Для выполнения дальнейших расчётов данная модель панели № 2 была доработана. В транспортной сбойке лавы смоделирована рециркуляционная установка.

Далее выполнено исследование влияния рециркуляции воздуха на снижение температуры воздуха на участке сопряжения лавы со вспомогательным штреком после энергопоезда, там, где наблюдалась максимальная температура воздуха. Исследовалось снижение температуры в зависимости от следующих параметров:

- коэффициента рециркуляции;

— удаленности рециркуляционной сбойки и температуры рециркулируемого воздуха.

Результаты численных экспериментов при температуре массива горных пород +24 °С, мощности тепловыделения от энергопоезда 150 кВт и расходе свежего воздуха 10 м³/с, подаваемого к участку за счет общешахтного проветривания, приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 — Результаты расчета эффективности рециркуляционного проветривания

Удаленность сбойки и температура рециркулируемого воздуха	Коэффициент рециркуляции			
	0 %	25 %	50 %	75 %
250 м 25,1 °С	34,6 °С	32,6 °С	29,8 °С	27,1 °С
500 м 24,4 °С	34,6 °С	32,5 °С	29,8 °С	26,9 °С
1000 м 24,2 °С	34,6 °С	32,1 °С	29,4 °С	26,8 °С

Аналогичные расчеты, проведенные для температуры массива +28 °С, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Результаты расчета эффективности рециркуляционного проветривания при температуре массива +28 °С

Удаленность сбойки и температура рециркулируемого воздуха	Коэффициент рециркуляции			
	0 %	25 %	50 %	75 %
250 м 29,4 °С	38,6 °С	36,6 °С	33,8 °С	31,1 °С
500 м 28,5 °С	38,6 °С	36,5 °С	33,8 °С	30,9 °С
1000 м 28,1 °С	38,6 °С	36,1 °С	33,4 °С	30,8 °С

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что применение систем частичного повторного использования воздуха позволяет улучшить микроклиматические условия за счёт уменьшения нагрева воздушной струи из-за увеличения общего расхода воздуха, ассимилирующего тепловыделения от энергопоезда лавы, а

также увеличения охлаждающего эффекта воздушной струи за счет повышения скорости движения воздуха.

Кроме того, дополнительным эффектом нормализации микроклиматических условий за счет рециркуляции является то, что увеличение скорости движения воздуха в выработках само по себе приводит к увеличению охлаждающего эффекта воздушной струи.

4.2. Испытания системы рециркуляционного проветривания для нормализации микроклиматических условий на руднике 4 РУ ОАО «Беларуськалий»

Для экспериментального подтверждения результатов исследований в шахтных условиях выполнены опытно-промышленные испытания локальных рециркуляционных систем проветривания для нормализации микроклиматических условий.

В качестве участка для проведения исследований была выбрана лава № 2с-3 панели № 2 горизонта -440 рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий», где температуры воздуха на начальном участке лавы достигают +34 °С. Детальный план горных выработок на участке лавы и в районе места установки вентиляторной установки приведен на рисунке 4.3.

Также на рисунке представлены результаты измерений температурно-влажностных параметров воздуха до организации схемы рециркуляционного проветривания.

На участке испытаний подготовка панели включает проведение 3-х воздухоподающих и 2-х вентиляционных штреков. Из 3-х воздухоподающих штреков один является транспортным, один конвейерным и один вспомогательным. Конвейерный штрек оборудован ленточным конвейером КЛ-600, тепловыделения от которого приводят к среднему превышению температуры воздуха температуры массива на 2...4 °С. Эти тепловыделения приводят к тому, что температура воздуха, подаваемого к энергопоезду комбайна, достигает +27,6 °С.

Основная выдача воздуха осуществляется по вентиляционному штреку лавы № 2с-3, а соседний вентиляционный штрек лавы № 2с-2 под действием горного давления в значительной степени задавлен и разрушен.

При работе комбайна тепловыделения от энергопоезда лавы составляют 151 кВт, приводя к нагреву воздуха с +24,1 °С до +34 °С.

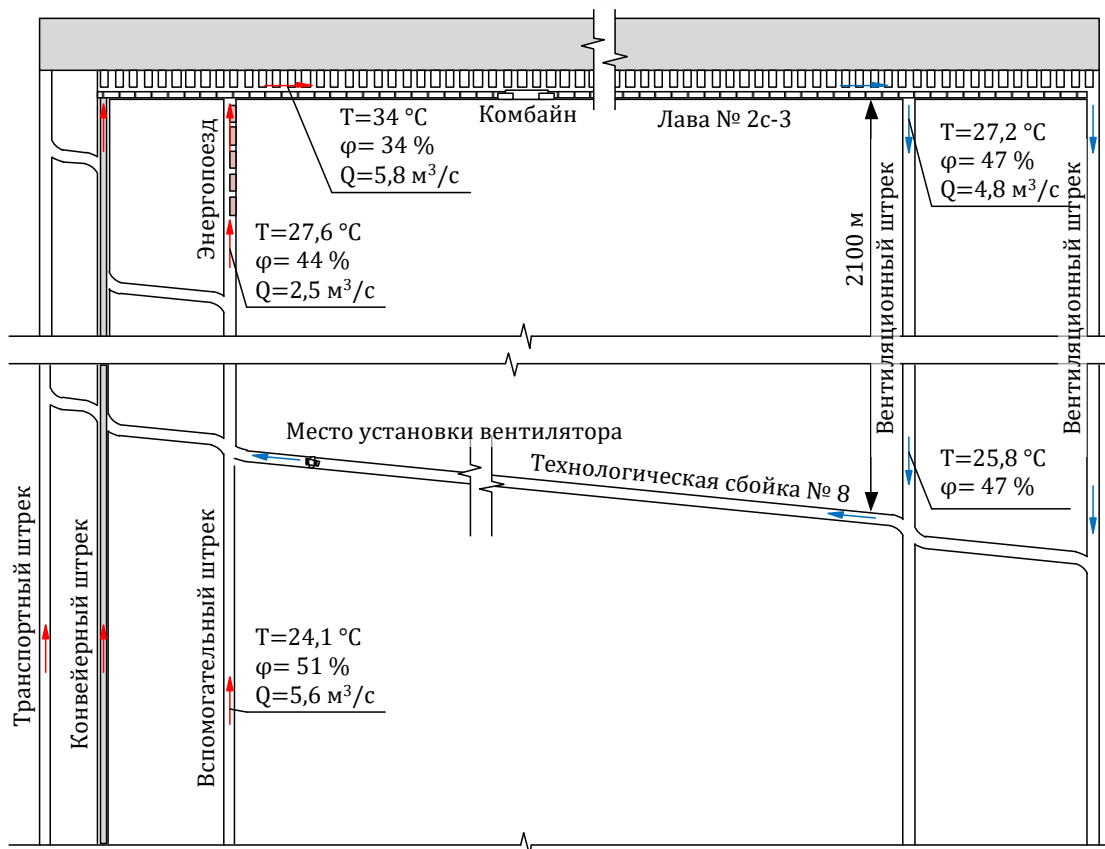


Рисунок 4.3 — Схематичное изображение организации локальной схемы рециркуляционного проветривания на лаве № 2с-3

Особый интерес представляет динамика изменения температуры воздуха при его движении по лаве и вентиляционному штреку, так как это напрямую влияет на возможность использования исходящей вентиляционной струи для снижения температуры воздуха в рабочей зоне. На рисунке 4.4 приведены результаты экспериментальных измерений динамики температуры воздуха при его движении от начала лавы, где он имеет максимальную температуру, далее вдоль лавы и панельного вентиляционного штрека.

На основании полученных измерений рассчитаны коэффициенты нестационарного теплообмена для лавы и вентиляционного штрека по формуле

$$k_{\tau} = \frac{c \cdot \rho \cdot Q}{P \cdot L} \ln \left(\frac{T_0 - T_m}{T(L) - T_m} \right), \quad (4.2)$$

где Q — расход воздуха в выработке, $\text{м}^3/\text{с}$;

P — периметр выработки, м;

L — расстояние между точками измерений температуры, м;

T_0 — температура воздуха в начальной по ходу движения воздуха точке измерения, $^{\circ}\text{C}$;

$T(L)$ — температура воздуха в конечной по ходу движения воздуха точке измерения, °С.



Рисунок 4.4 — Результаты экспериментального измерения температуры воздуха при его движении по лаве и панельному вентиляционному штраку

Результаты расчета приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 — Значения коэффициентов нестационарного теплообмена, вычисленные по результатам экспериментальных наблюдений

Участок измерения	Значение коэффициента нестационарного теплообмена, Вт/м ²
Лава 2С-3	0,0034
Вентиляционный штрек лавы 2С-3	0,0121

Расчет показал, что коэффициент нестационарного теплообмена в штраке в несколько раз больше, чем в лаве, несмотря на то что поверхность теплообмена в лаве с учетом контактирования части воздушной струи с обрушенным массивом значительно больше, чем поверхность стенок штрака. Вероятно, это связано с большими скоростями движения воздуха по штраку, нежели в объеме лавы.

На основании разработанной в разделе 4.1 математической модели и полученных результатов экспериментальных измерений определены эффективные места размещения и параметры работы рециркуляционных установок. При выборе места установки также было учтено состояние технологических сбоек для строительства в них перемычек и монтирования рециркуляционных вентиляторных установок. Кроме этого,

для каждого варианта установок выполнено моделирование воздухораспределения в вентиляционной сети рудника. В противном случае возникала опасность нарушения схемы проветривания панели, опрокидывание движения воздушных потоков по воздухоподающим выработкам.

В результате принято решение о строительстве перемычки в технологической сбойке № 8 столба лавы № 2с-3, где монтировалась рециркуляционная установка. Для испытаний было подготовлено два режима. Первый — для организации рециркуляционного проветривания установка располагалась в технологической сбойке вентилятора ВМ-6. Второй — использовался для этих же целей более производительный вентилятор ВМ-12.

На рисунке 4.5 приведена фотография смонтированной рециркуляционной вентиляторной установки на базе вентилятора ВМ-12 в перемычке технологической сбойки № 8. Вентиляторная установка оборудована обратным клапаном для возможности исключения рециркуляционного проветривания при задействовании аварийных режимов проветривания.



Рисунок 4.5 — Вентиляторная установка, смонтированная для организации рециркуляционного проветривания панели № 2 горизонта -440 рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий»

По результатам математического моделирования получены прогнозные значения температур воздуха в лаве при организации рециркуляционной схемы проветривания панели. В ходе проведения испытаний измерялись температуры, относительные влажности и скорости движения воздуха в пределах всего рециркуляционного контура.

Начальное распределение микроклиматических параметров в лаве представлено на рисунке 4.3, оно полностью соответствует экспериментальному распределению температур, по которому происходило параметрическое обеспечение и калибровка математической модели.

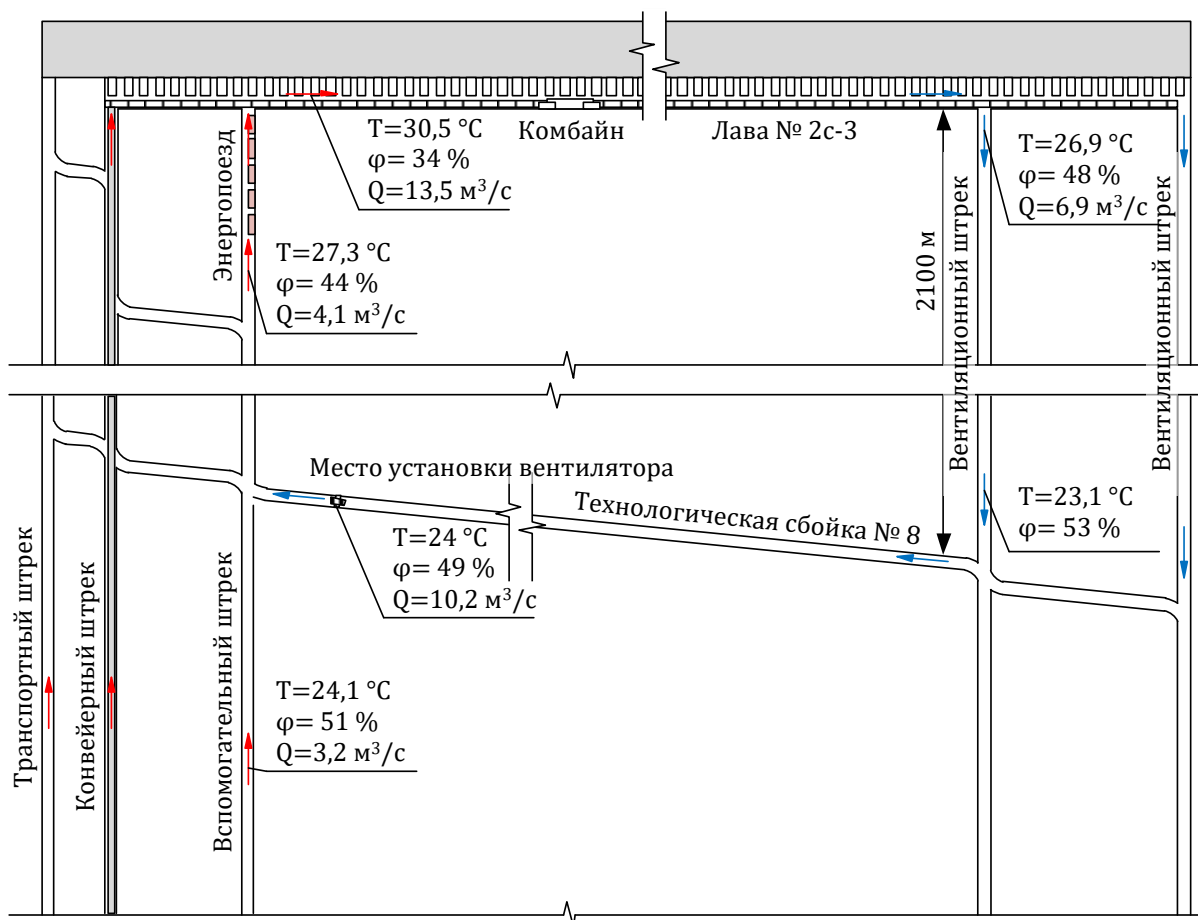


Рисунок 4.6 — Распределение микроклиматических параметров в лаве при увеличении подачи воздуха на 31 %

На первом этапе исследований был произведен монтаж рециркуляционной установки на базе вентилятора ВМ-6. Работа рециркуляционной установки позволила увеличить расход воздуха в лаве до $13,5 \text{ м}^3/\text{с}$ (на 31 %), скорость воздуха при этом составила $1,5 \text{ м/с}$.

При этом производительность непосредственно вентилятора составила $10,2 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, в эксперименте коэффициент рециркуляции составил 75 %. Кроме того, в ходе экспериментальных измерений дополнительно контролировалось, чтобы исходящая струя воздуха полностью успевала охладиться до температуры непоколебленного массива равной $23 \text{ }^\circ\text{C}$.

Экспериментальные измерения температуры воздуха подтвердили прогнозируемый эффект охлаждения воздуха до $+30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на $+2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

На втором этапе исследований был произведен монтаж рециркуляционной установки на базе вентилятора ВМ-12А, работающего в режиме эжекторной установки, расположенной непосредственно в вентиляционном штреке после лавы. В этом случае расход воздуха в лаве увеличивался до $21\text{ м}^3/\text{с}$, скорость воздуха возрастала до $2,5\text{ м/с}$.

На рисунке 4.7 приведено распределение температур в лаве и подготовительных выработках при увеличенном расходе воздуха до $21\text{ м}^3/\text{с}$. Экспериментальные измерения температуры воздуха подтвердили прогнозируемый эффект охлаждения воздуха до $+28,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на $+4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Увеличение скорости движения воздуха в лаве больше, чем на 2 м/с , приводит к интенсивному пылеобразованию, что ухудшает условия труда в лаве.

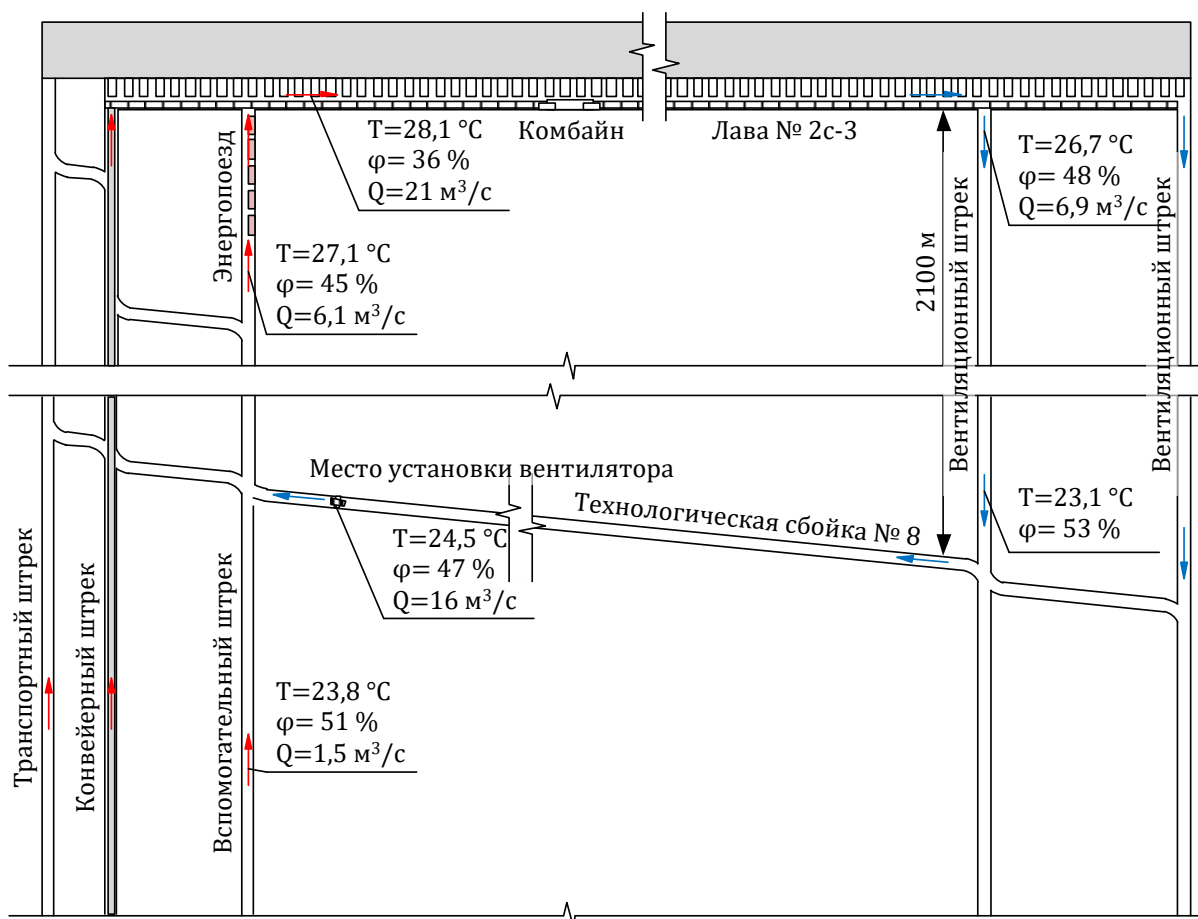


Рисунок 4.7 — Распределение микроклиматических параметров в лаве при увеличении подачи воздуха на 204 %

Проведенные опытно-промышленные испытания не только доказали состоятельность локального рециркуляционного проветривания как горнотехнического спо-

соба снижения температуры воздуха в лаве, но и подтвердили адекватность разработанных в главе 2 математических моделей для расчета процессов теплообмена и теплопереноса в сети горных выработок глубоких рудников.

В то же время установлено, что организация локальной рециркуляционной схемы проветривания воздуха сопровождается следующими особенностями:

- существенное снижение температуры воздуха происходит при больших коэффициентах рециркуляции, достигающих 50 % и выше, что требует строгого контроля на предмет увеличения выделения вредных факторов непосредственно в рабочих зонах;
- увеличение расхода воздуха в рабочей зоне за счет рециркуляции приводит к увеличению скорости движения воздуха в выработках, что может приводить к интенсивному пылеобразованию.

Таким образом, эффективность рециркуляционного проветривания зависит от ряда факторов и имеет свои особенности, учет которых необходим при определении возможности использования способа и его параметров. Поэтому в следующем разделе разработана методика расчета параметров рециркуляционного проветривания по тепловому фактору.

4.3. Расчет параметров рециркуляционного проветривания по тепловому фактору

Согласно выполненным исследованиям рециркуляционное проветривание для снижения температуры воздуха эффективно только в переходном интервале глубин, где температура нетронутого массива горных пород близка, но не превышает предельно допустимой температуры. Кроме того, должен быть достаточно интенсивный теплообмен исходящей вентиляционной струи с массивом горных пород. Таким образом, разработанный способ имеет ограниченную область эффективного применения. Поэтому необходима разработка практической методики оценки эффективности данного способа и расчета параметров применения для произвольных горнотехнических условий.

Теоретическая оценка возможности применения рециркуляционного проветривания может быть выполнена на основе выражения (4.1). Для этого в выражении расход воздуха удобнее представить в виде суммы расхода свежего воздуха Q_0 , подводимого к рециркуляционному контуру, и расхода Q_r , рециркулируемого с исходящей струи воздуха,

$$T_w = T_m + \frac{W}{c \cdot \rho \cdot (Q_0 + Q_r)}. \quad (4.3)$$

Для дальнейшего описания на рисунке 4.8 приведено схематичное изображение рециркуляционного контура.

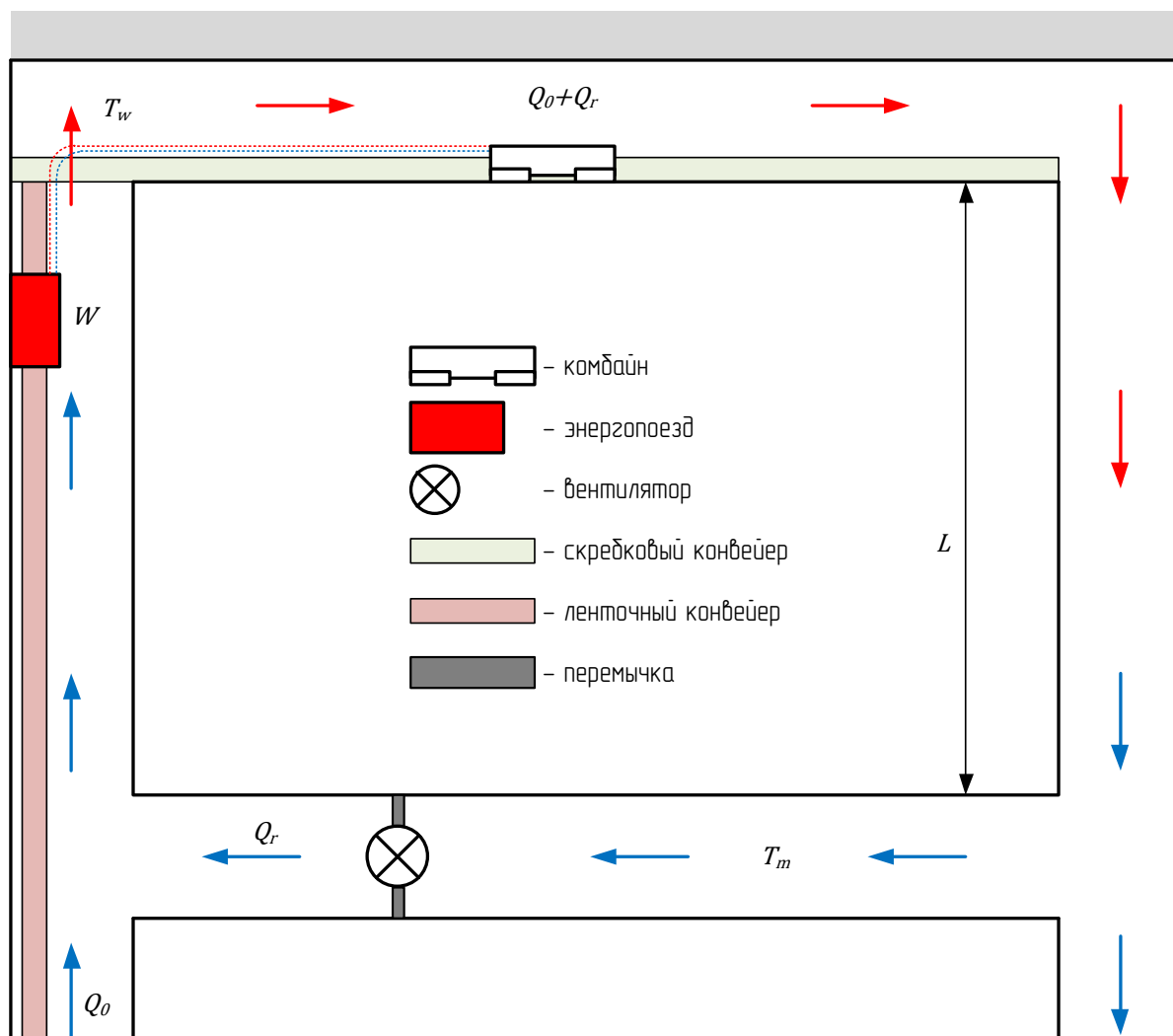


Рисунок 4.8 — Схема к определению параметров рециркуляционного проветривания для снижения температуры воздуха

Согласно определению коэффициента рециркуляции

$$K_r = \frac{Q_r}{(Q_0 + Q_r)}. \quad (4.4)$$

Выражая из этой формулы рециркулируемый расход Q_r и подставляя его в выражение (4.3), получим следующую формулу, выражающую температуру воздуха после источника тепловыделения через базовые параметры — расход свежего воздуха, мощность источника тепловыделения и коэффициент рециркуляции

$$T_w = T_m + \frac{(1 - K_r) \cdot W}{c \cdot \rho \cdot Q_0}. \quad (4.5)$$

Из полученного выражения следует, что при условии достижения рециркулируемым воздухом температуры нетронутого массива, наличие рециркуляции будет экви-

валентно эффективно снижению мощности источника тепловыделения. Например, коэффициент рециркуляции 0,5 эквивалентен снижению мощности источника тепловыделения в 2 раза. Физически это объясняется тем, что тепловыделения будут ассимилироваться большим объемом воздуха.

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

$$T_r \geq T_m + \frac{(1 - K_r^{max}) \cdot W}{c \cdot \rho \cdot Q_0}, \quad (4.6)$$

где T_r — требуемая температура воздуха на участке после источника тепловыделения, определяется согласно требованиям нормативных документов, °С;

K_r^{max} — максимально допустимый коэффициент рециркуляции, может определяться по ограничениям нормативного характера, а также по факторам газовыделения, пыли и максимальной скорости движения воздуха.

Кроме того, из полученного выражения следует, что способ рециркуляционного проветривания может быть эффективным только при условии, что температура нетрогнутого массива ниже допустимой температуры воздуха на участке после источника тепловыделений.

При выполнении неравенства (4.6) коэффициент рециркуляции определяется следующим образом

$$K_r = 1 - \frac{c \cdot \rho \cdot Q_0 \cdot (T_r - T_m)}{W}. \quad (4.7)$$

Далее необходимо произвести проверку вычисленного коэффициента рециркуляции по следующим позициям.

Первый момент — не превышает ли полученный коэффициент максимально допустимого согласно требованиям нормативных документов, если такие требования установлены.

Второй момент — не приводит ли рассчитанный коэффициент рециркуляции к превышению максимальной скорости движения воздуха в выработке или критической скорости по фактору пыли. Известно, что при увеличении скорости воздуха вначале происходит снижение концентрации пыли за счет ее эффективного выноса, но с некоторой скорости, называемой критической, концентрация пыли в атмосфере начинает расти по причине уже дополнительного пылеобразования из-за интенсивной скорости

движения воздушного потока [6]. Значение критической по пылевому фактору скорости движения воздуха определяется по формуле [6]

$$v_d = 0,033 \cdot \sqrt{\frac{0,15 \cdot W_B - 3,1}{\alpha}}, \quad (4.8)$$

где W_B — относительная влажность воздуха, %;

α — коэффициент аэродинамического сопротивления выработки.

Необходимым условием эффективного снижения температуры на основе рециркуляционного проветривания является достаточный теплообмен между исходящей струей воздуха и массивом горных пород. Для этого необходимо рассчитать расстояние L , пройдя которое, воздух с точностью до 1 °С примет температуру нетронутого массива горных пород.

Для расчета этого расстояния в условиях действующего предприятия лучше всего произвести вычисление коэффициента нестационарного теплообмена для выработок исходящей вентиляционной струи по формуле:

$$k_\tau = \frac{c \cdot \rho \cdot Q}{P \cdot L} \ln \left(\frac{T_0 - T_m}{T(L) - T_m} \right), \quad (4.9)$$

где Q — расход воздуха выработке, м³/с;

P — периметр выработки, м;

L — расстояние между точками измерений температуры, м;

T_0 — температура воздуха в начальной по ходу движения воздуха точке измерения, °С;

$T(L)$ — температура воздуха в конечной по ходу движения воздуха точке измерения, °С.

При известном коэффициенте нестационарного теплообмена искомое расстояние L определяется по формуле

$$L = \frac{c \cdot \rho \cdot Q}{P \cdot k_\tau} \ln(T_0 - T_m). \quad (4.10)$$

В выводе конечного выражения принято, что результирующая разница температур между исходящей вентиляционной струей и естественной температурой горных пород должна составлять не более 1 °С. Поэтому выражение, стоящее под логарифмом, является безразмерной разницей температурой.

После оценки целесообразности применения рециркуляционного проветривания для снижения температуры воздуха по формуле (4.6), а также определения его параметров по формулам (4.7) и (4.10) целесообразно провести детальное моделирование

распределения температуры и расходов воздуха на тепловой модели участка в сетевой постановке. Это важно сделать не только по причине уточнения параметров теплового режима, но и для решения вопросов организации схемы вентиляции с рециркуляцией воздуха. Для этого потребуются разработать решения по подбору параметров вентилятора, установке и параметрам вентиляционных сооружений и, возможно, строительству дополнительных горных выработок.

Кроме того, при реализации разработанного горнотехнического способа регулирования теплового режима предъявляются серьезные требования к вентиляционному оборудованию. В частности, для безопасной эксплуатации системы повторного использования воздуха должны оборудоваться средствами контроля качества исходящей струи, должны быть регулируемы и предусматривать возможность исключения аэродинамической связи между свежей и исходящей струей для задействования аварийных режимов проветривания, а также иметь систему автоматического управления параметрами работы.

4.4. Выводы

На основании проведенных исследований, направленных на разработку способа нормализации микроклимата в длинных очистных забоях на основе повторного использования воздуха, можно сформулировать следующие выводы:

- применение систем частичного повторного использования воздуха позволяет улучшить микроклиматические условия за счёт уменьшения нагрева воздушной струи из-за увеличения общего расхода воздуха, ассимилирующего тепловыделения от энергопоезда лавы;
- эффективность использования рециркуляции ограничена переходным интервалом глубин, когда естественная температура окружающего породного массива не превышает +26 °С, и исходящая струя воздуха полностью успевает охладиться до температуры непо потревоженного массива, что благоприятствует её повторному использованию;
- выбор параметров рециркуляционного проветривания по тепловому фактору необходимо производить с учетом естественной температуры окружающего массива, мощности источника тепловыделения в рабочей зоне и максимально возможного коэффициента рециркуляции;
- дополнительное увеличение охлаждающего эффекта воздушной струи достигается за счет повышения скорости движения воздуха.

Для реализации безопасного применения рециркуляционного проветривания предлагается применение сертифицированной шахтной вентиляторной установки ШВУ-12А, удовлетворяющей требованиям нормативных документов Республики Беларусь, обеспеченной системой автоматического управления и контроля параметров проветривания и качественного состава исходящей вентиляционной струи.

5. РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

5.1. Математическое моделирование теплообменных процессов в рекуперативных теплообменных аппаратах

Процессы нагревания, охлаждения и осушения вентиляционного воздуха в рудниках производятся пропусканьем его через систему теплообменных модулей, расположенных и соединённых между собой определённым образом. Температура воздуха, проходящего через установку, изменяется за счёт теплообмена с горячей водой или холодным антифризом, прогоняемым по теплообменникам. В процессе охлаждения воздуха с высокой относительной влажностью избыток влаги выпадает, инициируя процесс осушения [113].

При одинаковом общем расходе жидкости теплообменники могут быть соединены как последовательно, так и параллельно, или одни параллельно, а другие последовательно, и могут быть также расположены по воздуху в один или в несколько рядов. Кроме того, интенсивность теплообмена многорядной системы с последовательным подключением рядов зависит от направления подачи жидкости по отношению к направлению подачи воздуха. В различных вариантах компоновки процесс теплообмена между теплоносителем (хладагентом) и воздухом протекает по-разному, в одних случаях более интенсивно, в других — менее. Оптимальная компоновка теплообменных модулей определяется достижением максимальной тепловой мощности системы и зависит от начальных условий — начальных температур, объёмных расходов и скоростей движения воздуха и жидкости. В случае нагревания воздуха интерес представляет не только его конечная температура, но и температура теплоносителя на выходе, которая не должна опускаться ниже температуры замерзания.

Большинство существующих методов расчёта теплообмена основывается на простом усреднении температуры воздуха и жидкости, при котором температура сред при определении интенсивности теплообмена полагается равной средним значениям между начальными и конечными температурами [10,125,69]. Такой подход предполагает линейную зависимость температуры от координаты, и даёт тем большую ошибку, чем больше пути движения обменивающихся теплом сред [86]. Погрешность становится ещё больше, когда рассматривается система последовательно подключённых по жидкости или последовательно расположенных по воздуху калориферов, т.к. при этом путь и, соответственно, время теплообмена увеличиваются. Кроме того, чтобы прогнозировать замерзание калориферной установки, необходимо знание не средней темпера-

туры воды, а температуры её на выходе, поскольку именно там наибольшая вероятность кристаллизации и затвердевания теплоносителя.

В данном разделе работы разработана более совершенная модель теплообмена в рекуперативных теплообменных аппаратах, учитывающая вышеперечисленные особенности [170].

5.1.1. Перекрестное движение хладоносителя и воздуха

В первую очередь рассматривается система, состоящая из одного теплообменного аппарата, теплообмен которого с воздухом описывается зависимостью

$$j = k \cdot (T_w(x) - T_a(x, z)), \quad (5.1)$$

где z — координата по ходу движения воздуха, м;

x — координата по ходу движения теплоносителя, м;

j — плотность потока теплоты от теплоносителя к воздуху, Дж/м²·с;

T_w — температура теплоносителя, °С;

T_a — температура воздуха, °С;

k — коэффициент теплообмена, зависящий от скоростей движения теплоносителя и воздуха, Дж/м²·с·°С.

Пусть выделен некоторый объём воздуха сечением ΔS , м² и длиной ΔL , м по оси z , проходящий через теплообменник со скоростью v_a , м/с. Сечение ΔS полагается достаточно маленьким, чтобы температуру на этом участке теплового контакта можно было считать постоянной. Температура воздуха после теплового контакта на участке определяется по количеству теплоты ΔQ , Дж, полученному выделенным объёмом воздуха ΔV , м³ в соответствии с балансом теплосодержания:

$$Q_a^k = Q_a^0 + \Delta Q, \quad (5.2)$$

где Q_a^0 — начальное теплосодержание выделенного объема воздуха, Дж;

Q_a^k — конечное теплосодержание выделенного объема воздуха, Дж.

Теплосодержание выделенного объема воздуха можно также представить в виде

$$Q_a = c_a \cdot \rho_a \cdot \Delta V \cdot T_a, \quad (5.3)$$

где c_a — удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг·°С;

ρ_a — плотность воздуха, кг/м³;

ΔV — объем воздуха, м³;

Приращение теплоты ΔQ на участке можно вычислить как точное интегральное среднее за время теплового контакта Δt

$$\Delta Q = \Delta F \cdot \int_0^{\Delta t} j \cdot dt, \quad (5.4)$$

где ΔF — площадь поверхности участка теплообмена, м^2 .

Время теплового контакта Δt определяется через длину участка и скорость движения воздуха следующим образом

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{v_a}. \quad (5.5)$$

При подстановке (5.5) и (5.4) в (5.3) и дифференцировании по z получается дифференциальное уравнение для функции j в следующем виде

$$\frac{\partial j}{\partial z} = - \frac{k \cdot \Delta F}{c_v \cdot \rho_v \cdot v_v \cdot \Delta S \cdot \Delta L} \cdot j(x, z). \quad (5.6)$$

Начальное условие для решения данного уравнения имеет вид

$$j = k \cdot (T_w(x) - T_a^0), \quad (5.7)$$

где T_a^0 — начальная температура воздуха.

Решение уравнения с подставленным начальным условием имеет вид

$$j(x, z) = k \cdot (T_w(x) - T_a^0) \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot \Delta F \cdot z}{c_a \cdot \rho_a \cdot v_a \cdot \Delta S \cdot \Delta L}\right). \quad (5.8)$$

В предположении однородности теплообменника выполняется условие

$$\frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{F}{f_a}, \quad (5.9)$$

где F — общая поверхность теплообмена, м^2 ;

f_a — сечение калорифера по воздуху, м^2 .

Массовый расход воздуха выражается через параметры задачи следующим образом

$$q_a = \rho_a \cdot v_a \cdot f_a. \quad (5.10)$$

Подстановка (5.10) в (5.9) дает значение температуры воздуха на выходе

$$T_a^k(x) = T_w(x) - C \cdot (T_w(x) - T_a^0) \quad (5.11)$$

с безразмерным комплексом

$$C = \exp\left(-\frac{k \cdot F}{c_a \cdot q_a}\right), \quad (5.12)$$

характеризующим соотношением интенсивности теплообмена и выноса теплоты.

Полученная формула ещё не является конечной, поскольку неизвестна температура воды $T_w(x)$. Для определения температуры воды также используется уравнение баланса теплоты между воздухом и теплоносителем

$$\Delta Q_a = \Delta Q_w, \quad (5.13)$$

$$\Delta Q_w = \rho_w \cdot c_w \cdot (T_w^0 - T_w(x)) \cdot f_w \cdot \Delta x, \quad (5.14)$$

где f_w — сечение трубки течения воды, м²;

Δx — длина трубки в пределах одного «эшелона», м;

ρ_w — плотность воды, кг/м³;

c_w — удельная теплоёмкость воды, Дж/кг·°С;

T_w^0 — начальная температура воды, °С.

В то же время отдача теплоты воздуху определяется выражением

$$\Delta Q_a = \int_0^{\Delta t} \bar{j} \cdot \Delta F \cdot dt, \quad (5.15)$$

где Δt — время теплообмена, с;

\bar{j} — интегральное среднее плотности потока теплоты на промежутке ΔL , Дж/м²·с.

Время теплообмена можно выразить через продольную координату и скорость движения воды следующим образом

$$\Delta t = \frac{x}{v_w}, \quad (5.16)$$

где v_w — скорость движения воды в трубках, м/с.

Интегральное среднее плотности потока теплоты определяется следующим выражением

$$\bar{j} = \frac{1}{\Delta L} \int_0^{\Delta L} j(x, z) \cdot dz. \quad (5.17)$$

При подстановке выражения (5.8) в (5.17) получаем

$$\bar{j} = (1 - C) \cdot (T_w(x) - T_v^0) \cdot \frac{c_a \cdot q_a}{F}. \quad (5.18)$$

Подстановка последней зависимости (5.18) в (5.15), и далее полученного выражения в уравнения баланса теплоты (5.13) и (5.14) с дальнейшим дифференцированием по x даёт дифференциальное уравнения для определения температуры воды следующего вида

$$-\frac{dT_w(x)}{x} = \frac{(1 - C)}{L} \cdot (T_w(x) - T_{v0}) \cdot \frac{c_a \cdot q_a}{c_w \cdot q_w}. \quad (5.19)$$

С начальным условием

$$T_w(0) = T_w^0. \quad (5.20)$$

При выводе дифференциального уравнения учтены следующие тождества

$$q_w = \rho_w \cdot v_w \cdot f_w, \quad (5.21)$$

$$\frac{\Delta F}{\Delta L} = \frac{F}{L}. \quad (5.22)$$

Решение полученного обыкновенного однородного дифференциального уравнения методом разделения переменных дает решение вида

$$T_w(x) = T_v^0 + (T_w^0 - T_v^0) \cdot e^{-A \cdot x}, \quad (5.23)$$

в котором введен следующий параметр

$$A = \frac{(1 - C)}{L} \cdot \frac{c_a \cdot q_a}{c_w \cdot q_w}. \quad (5.24)$$

При его подстановке в (5.11) зависимость для определения температуры воздуха приобретает вид

$$T_v^k(x) = T_v^0 + (T_w^0 - T_v^0) \cdot e^{-A \cdot x}. \quad (5.25)$$

Если теплообменный аппарат имеет n ходов, то среднее по m -му ходу вычисляется следующим образом

$$\overline{T_v^{km}} = \frac{n}{L} \int_{\frac{m-1}{n} \cdot L}^{\frac{m}{n} \cdot L} T_v^k(x) \cdot dx. \quad (5.26)$$

Интеграл в правой части выражения можно вычислить следующим образом

$$\overline{T_v^{km}} = T_v^0 + n \cdot \frac{c_q \cdot q_v}{c_w \cdot q_w} \cdot (T_w^0 - T_v^0) \cdot \left(e^{-A \cdot \frac{m-1}{n} \cdot L} - e^{-A \cdot \frac{m}{n} \cdot L} \right). \quad (5.27)$$

Тогда средняя температура воздуха по всем ходам вычисляется как

$$\overline{T_v^k} = T_v^0 + \frac{c_q \cdot q_v}{c_w \cdot q_w} \cdot (T_w^0 - T_v^0) \cdot (1 - e^{-A \cdot L}). \quad (5.28)$$

Для системы из нескольких теплообменных аппаратов расчёт аналогичен. Предполагается, что теплообменные аппараты в системе одинаковые и ряды теплообменников (последовательные по воздуху) подключены параллельно по воде, а ряды содержат равное количество последовательных по воде цепочек теплообменных аппаратов, содержащих равное количество теплообменников. В большинстве случаев на практике реализуется именно такая компоновка. В этом случае система распадается на n_0 подсистем, содержащих $n_r \cdot n_k^0$ теплообменников, здесь n_0 — количество последовательных по воде цепочек теплообменников в каждом ряду, n_k^0 — количество калориферов в каждой цепочке и n_r — количество рядов. И расчёт достаточно провести только для одной подсистемы, для остальных будет то же самое. В расчёте фигурирует условный теплообменник, эквивалентный последовательной цепочке, т.е. теплообменный аппарат, у которого в n_k^0 раз больше ходов (и L , соответственно, в n_k^0 раз больше) и в n_k^0 раз больше сечение по воздуху. Для одного ряда по воздуху, с учётом вышесказанного, по-

лученные формулы не изменяются. Для двух или нескольких рядов теплообменников считается, что воздух, нагретый неравномерно первым рядом, успевает выравнять свою температуру по сечению в результате перемешивания, прежде чем дойдёт до второго ряда. Расчёт повторяется после каждого ряда по воздуху с новыми начальными значениями температур воздуха и воды, если ряды подключены последовательно по воде. Выходные значения температур воздуха и воды первого ряда будут являться начальными значениями для второго, второго — для третьего и т.д. Если направления движения сред противоположны, то алгоритм расчёта дополняется использованием итерационного метода прогонки.

5.1.2. Однонаправленное движение хладоносителя и воздуха

В этом случае, в отличие от варианта поперечного расположения теплообменных трубок, изменения температур воздуха и теплоносителя происходят только в продольном направлении z . Формула (5.1) для плотности потока теплоты от теплоносителя в воздух j_a , (Дж/м²·с) и наоборот j_w , (Дж/м²·с) принимает вид, в котором зависимости по x нет, но температуры обеих сред зависят от z

$$j = j_a = -j_w = k \cdot (T_w(z) - T_a(z)), \quad (5.29)$$

где z — координата по ходу движения воздуха, м;

T_w — температура воды, °С;

T_a — температура теплоносителя, °С;

k — коэффициент теплообмена, зависящий от скоростей движения воды, воздуха и других параметров (определяется эмпирическим или экспериментальными путями).

Система пересекающихся спиралей упрощается до системы параллельно расположенных теплообменных трубок, обтекаемых потоком воздуха. Длина трубок полагается равной длине проекции спирали на ось z , сечения по воздуху и по воде, поверхность теплообмена, аэродинамическое и гидравлическое сопротивления принимаются такими же, как и у спирали. В целях получения аналитического решения потоки воздуха вдоль каждой из трубок полагаются не взаимодействующими друг с другом, а усреднение их температуры в результате перемешивания производится после прохождения всего пути теплообмена (длины одной трубки).

Баланс теплосодержаний Q_a , (Дж) и Q_w , (Дж) выделенных объёмов воздуха V_a , (м³) и V_w , (м³) воды имеет вид:

$$\begin{cases} Q_a(z) = Q_a^0 + \Delta Q_a(z) \\ Q_w(z) = Q_w^0 + \Delta Q_w(z) \end{cases} \quad (5.30)$$

где Q_a^0 — начальное теплосодержание воздуха, Дж;

Q_w^0 — начальное теплосодержание воды, Дж;

ΔQ_a — изменение теплосодержания воздуха из-за теплообмена с водой, Дж;

ΔQ_w — изменение теплосодержания воды из-за теплообмена с воздухом, Дж;

Для определённости теплоноситель полагается горячим, а воздушная среда — холодной, в противном случае ΔQ_a и ΔQ_w будут иметь отрицательные значения.

Изменения теплосодержаний определяются интегрированием потоков теплоты по координате z

$$\begin{cases} \Delta Q_a(z) = \int_0^z j(z) \cdot \Delta F_a \cdot \frac{dz}{v_a} \\ \Delta Q_w(z) = \int_0^z j(z) \cdot \Delta F_w \cdot \frac{dz}{v_w} \end{cases} \quad (5.31)$$

где ΔF_a — площадь поверхности теплообмена выделенного объёма воздуха, м²;

ΔF_w — площадь поверхности теплообмена выделенного объёма воды, м²;

v_a — скорость продольного движения воздуха, м/с;

v_w — скорость продольного движения воды, м/с.

Теплосодержания сред связаны с их температурами следующими зависимостями

$$\begin{cases} Q_a(z) = \rho_a \cdot c_a \cdot V_a \cdot T_a(z) \\ Q_w(z) = \rho_w \cdot c_w \cdot V_w \cdot T_w(z) \end{cases} \quad (5.32)$$

где ρ_a — плотность воздуха, кг/м³;

c_a — удельная теплоёмкость воздуха, Дж/кг·°С;

ρ_w — плотность воды, кг/м³;

c_w — удельная теплоёмкость воды, Дж/кг·°С.

После подстановки (5.31) в (5.30) и дифференцирования по z , последующей подстановки в выражение формул (5.29) и (5.32) получается следующая система дифференциальных уравнений для определения температур обеих сред

$$\begin{cases} \frac{dT_a(z)}{dz} = \frac{1}{\rho_a \cdot c_a \cdot V_a} \cdot \frac{\Delta F_a}{v_a} \cdot k \cdot (T_w(z) - T_a(z)) \\ \frac{dT_w(z)}{dz} = \frac{1}{\rho_w \cdot c_w \cdot V_w} \cdot \frac{\Delta F_w}{v_w} \cdot k \cdot (T_w(z) - T_a(z)) \end{cases} \quad (5.33)$$

В предположении геометрической однородности теплообмена по всей длине спирали можно принять

$$\frac{\Delta F_a}{V_a \cdot v_a} = \frac{F}{q_a \cdot L'} \quad (5.34)$$

$$\frac{\Delta F_w}{V_w \cdot v_w} = \frac{F}{q_w \cdot L'} \quad (5.35)$$

где q_a — объемный расход воздуха, м³/с;

q_w — объемный расход воды, м³/с;

L — продольный размер спирали (проекция длины на ось z), м;

F — общая площадь поверхности теплообмена одной спирали, м²;

В результате (5.33) принимает вид

$$\begin{cases} \frac{dT_a(\zeta)}{d\zeta} = A_a \cdot (T_w(\zeta) - T_a(\zeta)) \\ \frac{dT_w(\zeta)}{dz} = A_w \cdot (T_w(\zeta) - T_a(\zeta)) \end{cases}, \quad (5.36)$$

В полученные уравнения введена безразмерная координата и два безразмерных комплекса

$$\zeta = \frac{z}{L}, \quad (5.37)$$

$$\begin{aligned} A_a &= \frac{F \cdot k}{\rho_a \cdot c_a \cdot q_a} \\ A_w &= \frac{F \cdot k}{\rho_w \cdot c_w \cdot q_w} \end{aligned} \quad (5.38)$$

Начальные условия для дифференциальных уравнений имеют вид

$$\begin{aligned} T_a(0) &= T_a^0 \\ T_w(0) &= T_w^0 \end{aligned} \quad (5.39)$$

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (5.36) с начальными условиями (5.39) имеет вид

$$\begin{cases} T_a(\zeta) = T_a^0 \cdot e^{-(A_a+A_w)\zeta} + \left(\frac{T_a^0}{1 + \frac{A_a}{A_w}} + \frac{T_w^0}{1 + \frac{A_w}{A_a}} \right) \cdot (1 - e^{-(A_a+A_w)\zeta}) \\ T_w(\zeta) = T_w^0 \cdot e^{-(A_a+A_w)\zeta} + \left(\frac{T_a^0}{1 + \frac{A_a}{A_w}} + \frac{T_w^0}{1 + \frac{A_w}{A_a}} \right) \cdot (1 - e^{-(A_a+A_w)\zeta}) \end{cases} \quad (5.40)$$

Для анализа полученные решения можно записать в более удобном виде

$$\begin{cases} T_a(\zeta) = \tau_0 + (T_{a0} - \tau_0) \cdot e^{-(A_a+A_w)\zeta} \\ T_w(\zeta) = \tau_0 + (T_{w0} - \tau_0) \cdot e^{-(A_a+A_w)\zeta} \end{cases} \quad (5.41)$$

в котором используется следующее выражение

$$\tau_0 = \frac{T_{a0}}{1 + \frac{A_a}{A_w}} + \frac{T_{w0}}{1 + \frac{A_w}{A_a}}. \quad (5.42)$$

Из полученного решения видно, что при температуре воздуха, меньшей значения (5.42), температура теплоносителя больше температуры воздуха, и температура воздуха увеличивается по мере его движения, и наоборот, при температуре воды меньшей значения (5.42), температура воды уменьшается по мере ее движения.

5.1.3. Противоположно направленное движение хладоносителя и воздушной среды

Моделирование производится по аналогии с предыдущим вариантом однонаправленного движения. Если принять, что воздух движется в том же направлении, а теплоноситель — в обратном, то в системе уравнений (5.30) следует изменить знак перед ΔQ_w . Соответственно, в системе дифференциальных уравнений (5.36) для определения температур воздуха и воды также изменяется знак

$$\begin{cases} \frac{dT_a(\zeta)}{d\zeta} = A_a \cdot (T_w(\zeta) - T_a(\zeta)) \\ \frac{dT_w(\zeta)}{dz} = A_w \cdot (T_w(\zeta) - T_a(\zeta)) \end{cases}. \quad (5.43)$$

Начальные условия в данной задаче имеют вид

$$\begin{cases} T_a(0) = T_{a0} \\ T_w(L) = T_{w0} \end{cases}. \quad (5.44)$$

Решение (5.40) имеет вид:

$$\begin{cases} T_a(\zeta) = \frac{\alpha \cdot T_{a0} - T_{w0}}{\alpha - 1} + \frac{T_{w0} - T_{a0}}{\alpha - 1} \cdot e^{(A_w - A_a) \cdot \zeta} \\ T_w(\zeta) = \frac{\alpha \cdot T_{a0} - T_{w0}}{\alpha - 1} + \frac{\alpha \cdot (T_{w0} - T_{a0})}{\alpha - 1} \cdot e^{-(A_w - A_a) \cdot (1 - \zeta)} \end{cases}, \quad (5.45)$$

в котором введен безразмерный параметр

$$\alpha = \frac{A_w \cdot e^{A_w}}{A_a \cdot e^{A_a}}. \quad (5.46)$$

Полученное решение применимо для численного расчёта во всей области параметров задачи, за исключением $\alpha = 1$, где требуются дополнительные аналитические преобразования, связанные с раскрытием неопределённости. Использование правила Лопиталья при $\alpha = 1$ даёт зависимости для обменивающихся теплотой одинаковых сред, вид которых очевиден и без расчётов по соображениям симметрии процесса

$$\begin{cases} T_a(\zeta) = T_a^0 + \zeta \cdot (T_w^0 - T_a^0) \\ T_w(\zeta) = T_w^0 + (1 - \zeta) \cdot (T_a^0 - T_w^0) \end{cases}. \quad (5.47)$$

С помощью полученных зависимостей (5.41) и (5.47) для расчёта температур воздуха и воды можно смоделировать процесс теплообмена в теплообменной секции, развёрнутой вдоль потока воздуха. Если трубки соединены последовательно по теплоносителю, то, как и для варианта поперечного расположения, при численном расчёте начальная температура воды в каждой последующей трубке полагается равной расчётной температуре воды на выходе предыдущей. Изменения температуры воздуха, контактирующего с каждой трубкой, считаются обособленно. На выходе температуры отдельных потоков воздуха усредняются, имитируя смешение.

Следует ожидать, что максимальную интенсивность теплообмена обеспечивает противоположно-продольная конфигурация расположения трубок, а минимальную — однонаправленно-продольная. Интенсивность теплообмена поперечной конфигурации занимает промежуточное положение. Если же в секции трубки соединены последовательно по воде, то разворот секции на 90° приводит к продольной конфигурации с чередованием направлений движения воды по отношению к воздуху, что не приведет к улучшению теплообмена.

5.1.4. Учет конденсации влаги при охлаждении воздуха

Расчёт охлаждения воздуха делается по аналогии с вышеизложенным расчётом нагрева, но с учётом выделения теплоты при конденсации, которая идёт на дополнительный нагрев жидкости. Плотность потока теплоты от воздуха к жидкости имеет в данном случае две составляющих: j_1 , (Дж/м²·с) — обычный поток теплоты в результате теплообмена и j_2 , (Дж/м²·с) — поток теплоты в результате тепловыделения. В этом случае к тепловому потоку добавляется слагаемое

$$j = k \cdot (T_w(x) - T_a(x, z)) - \left| \frac{\Delta W}{\Delta F \cdot \Delta t} \right|, \quad (5.48)$$

где ΔW — дополнительное количество теплоты, поглощаемое за счет конденсации влаги на участке теплообмена, Дж.

Последнее слагаемое в выражении можно представить следующим образом

$$\frac{\Delta W}{\Delta F \cdot \Delta t} = \frac{\Delta V}{\Delta F} \cdot r \cdot \frac{dC_H}{dT} \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (5.49)$$

где r — удельная теплота парообразования, Дж/кг;

C_H — концентрация насыщенного пара, кг/м³;

T — температура воздуха, °С;

ΔV — выделенный объем воздуха, м³;

ΔF — поверхность теплообмена, м².

В макромасштабах в предположении об однородности системы можно предположить, что

$$\frac{\Delta V}{\Delta F} = \frac{f_a \cdot \Delta \varepsilon}{F}, \quad (5.50)$$

где f_a — сечение теплообменника для прохода воздуха, м²;

F — общая поверхность теплообмена, м²;

$\Delta \varepsilon$ — ширина теплообменника по воздуху, м;

Переход к дифференцированию по z даёт следующее дифференциальное уравнение

$$j = k \cdot (T_w(x) - T_a(x, z)) + \frac{f_a \cdot \Delta \varepsilon \cdot r \cdot C'_H \cdot v_a}{F} \cdot \frac{dT_a}{dz}, \quad (5.51)$$

где C'_H — постоянная, равная скорости изменения концентрации насыщенного пара от температуры, кг/м³·°С.

В полученном выражении оба слагаемых отрицательны, что означает, что поток теплоты идёт от воздуха к жидкости. С другой стороны, изменение температуры воздуха может определяться по изменению теплосодержания ΔQ , Дж:

$$T_a = T_a^0 + \frac{\Delta Q}{c_a \cdot \rho_a \cdot \Delta V}. \quad (5.52)$$

С учетом того, что

$$\Delta Q = \int_0^{\Delta t} j_1 \cdot \Delta F \cdot dt, \quad (5.53)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta \varepsilon}{v_a}. \quad (5.54)$$

Дифференцируя (5.51) по z , получаем

$$\frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{F}{c_a \cdot q_a \cdot \Delta \varepsilon} \cdot j_1. \quad (5.55)$$

Сравнение (5.55) с (5.51), в котором второе слагаемое есть j_2 , даёт тождество вида

$$b \cdot j_1 = j_2, \quad (5.56)$$

где введенный безразмерный параметр b определяется следующим образом

$$b = \frac{r \cdot C'_H}{c_v \cdot \rho_v}. \quad (5.57)$$

Полученная константа b по справочным данным составляет величину, равную 2. Это позволяет сделать следующий важный оценочный вывод: нагрев жидкости двумя

третьими обязан тепловыделению при конденсации и только одной третью — теплообмену с воздухом, то есть пренебрежение теплотой фазового перехода недопустимо. Подстановка последних зависимостей в (5.55), дифференцирование по z и решение полученного дифференциального уравнения даёт

$$j(x, z) = (b + 1) \cdot k \cdot (T_w(x) - T_a^0) \cdot e^{-\frac{k \cdot F \cdot z}{c_a \cdot q_a \cdot \Delta \varepsilon}}. \quad (5.58)$$

Уравнение (5.58) отличается от аналогичного (5.8) для сухого воздуха только коэффициентом b , которым характеризуется дополнительный поток теплоты в теплоноситель в результате тепловыделения при конденсации. При $b = 0$ выделения теплоты нет, и это следует использовать, поскольку выделение влаги может быть, а может и не быть, в зависимости от степени насыщенности воздуха паром (относительной влажности). Кроме того, поскольку жидкость будет нагреваться по мере движения по трубкам теплообменника от начала до конца, конденсация на начальном холодном участке может происходить, а дальше — нет. К тому же, по оси z (толщина калорифера вдоль движения воздуха), выделение влаги тоже будет происходить не на одинаковом расстоянии от передней кромки. Это может быть учтено следующим образом:

$$b = \begin{cases} 0, & T_a(x, z) > T_a^{cr} \\ \frac{r \cdot C'_H}{c_a \cdot \rho_a}, & T_a(x, z) \leq T_a^{cr} \end{cases} \quad (5.59)$$

где T_a^{cr} — критическая температура воздуха для данной абсолютной влажности воздуха, °С.

Для того чтобы определять температуру жидкости также, как и раньше, считается средняя в направлении z плотность потока теплоты

$$\overline{j(x)} = \frac{1}{\Delta \varepsilon} \cdot \int_0^{\Delta \varepsilon} j(x, z) \cdot dz, \quad (5.60)$$

$$\overline{j(x)} = \frac{1}{\Delta \varepsilon} \cdot \left(\int_0^{z_{cr}(x)} j(x, z) \cdot dz + \int_{z_{cr}(x)}^{\Delta \varepsilon} j(x, z) \cdot dz \right), \quad (5.61)$$

где $z_{cr}(x)$ — расстояние от начала кромки, на котором начинается конденсация влаги, м.

При подстановке (5.58) в (5.61):

$$\overline{j(x)} = \frac{c_a \cdot q_a}{F} \cdot (T_w(x) - T_a^0) \cdot \left(1 + b \cdot e^{-\frac{k \cdot F \cdot z_{cr}(x)}{c_a \cdot q_a \cdot \Delta \varepsilon}} - b \cdot e^{-\frac{k \cdot F}{c_a \cdot q_a}} \right). \quad (5.62)$$

Теплота, переданная теплоносителю воздухом и конденсацией, определяется следующим интегралом

$$\Delta Q_2 = \int_0^{\Delta t} \overline{j(x)} \cdot \Delta F \cdot dt. \quad (5.63)$$

Теплота, полученная теплоносителем,

$$\Delta Q_1 = \rho_w \cdot c_w \cdot (T_w^0 - T_w(x)) \cdot f_w \cdot \Delta x. \quad (5.64)$$

Приравнявая ΔQ_1 и ΔQ_2 , переходя к макромасштабам и дифференцируя по x , получаем следующее дифференциальное уравнение

$$-q_w \cdot c_w \cdot \frac{dT_w(x)}{dx} = \frac{\overline{j(x)} \cdot F}{L}, \quad (5.65)$$

где L — общая длина пути жидкости (длина трубки единичного теплообменника), м.

Расстояние $z_{cr}(x)$ может быть определено из уравнения (5.61), если проинтегрировать его от 0 до $z_{cr}(x)$

$$T_v^{cr} = T_{v0} + \frac{F}{c_v \cdot q_v \cdot \Delta \varepsilon} \cdot \int_0^{z_{cr}(x)} j_1(x, z) \cdot dz. \quad (5.66)$$

Подставляя в это выражение следующую формулу

$$j_1(x, z) = \frac{j(x, z)}{b + 1}. \quad (5.67)$$

и выполнив интегрирование, получаем следующее решение

$$\zeta(x) = \frac{c_a \cdot q_a}{k \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{T_a^0 - T_w(x)}{T_a^{cr} - T_w(x)} \right). \quad (5.68)$$

В полученном решении введен безразмерный параметр

$$\zeta(x) = \frac{z_{cr}(x)}{\Delta \varepsilon}. \quad (5.69)$$

Теперь, если положить $\zeta = 1$, то уравнение (5.69) станет уравнением для определения x_{cr} , м — точки на оси x , где выпадение влаги прекратится. Точнее, отсюда может быть определена только $\theta = T_w(x_{cr})$, а само значение x_{cr} может быть получено из формулы (5.25) с небольшим изменением. Формула (5.25) была получена без учёта выделения теплоты при конденсации. В данном случае на всём участке от 0 до x_{cr} конденсация есть, значит при выводе должна использоваться формула (5.58) для j , которая отличается от (5.25) только коэффициентом $(b + 1)$. Таким образом, (5.23) принимает вид

$$T_w(x) = T_{v0} + (T_{w0} - T_{v0}) \cdot e^{-(b+1) \cdot A \cdot x}. \quad (5.70)$$

после введения безразмерного параметра

$$\xi_{cr} = \frac{x_{cr}}{L}. \quad (5.71)$$

И решая уравнение (5.70) относительно этого параметра получаем выражение вида

$$\xi_{cr} = \frac{c_w \cdot q_w}{c_a \cdot q_a \cdot (1 + b) \cdot (1 - C)} \cdot \ln \left(\frac{T_v^0 - T_w^0}{T_v^0 - T_v^{cr}} \cdot (1 - C) \right). \quad (5.72)$$

Возможны три варианта: когда параметр больше единицы, находится в пределах от 0 до 1, или не определен, если под логарифмом отрицательная величина. Первый вариант соответствует выпадению влаги на всём участке, третий — выпадение влаги не происходит нигде, и второй вариант — частичное выпадение на начальном участке. Третий вариант был уже рассмотрен для сухого воздуха. Формулы для сухого воздуха (температуры воды и воздуха) могут быть использованы и для первого варианта, только с заменой A в (12) на $A \cdot (b + 1)$.

Фактически, первый вариант сводится к третьему варианту заменой обычной удельной теплоёмкости воды на эффективную

$$c_w^{eff} = \frac{c_w}{1 + b}. \quad (5.73)$$

Второй вариант следует рассмотреть отдельно. В этом случае

$$\overline{J(x)} = \begin{cases} \overline{J_1}, & x \leq x^{cr} \\ \overline{J_3}, & x > x^{cr}. \end{cases} \quad (5.74)$$

где $\overline{J_1}$ — соответствует первому варианту («влажный воздух»);

$\overline{J_3}$ — третьему варианту («сухой воздух»).

Оба этих решения должны «сшиваться» на границе x^{cr} .

Что касается промежутка от x^{cr} до L , то решение будет аналогичным (5.70), но константа будет в виде

$$T_w(x) = T_a^0 + B \cdot e^{-A \cdot x}. \quad (5.75)$$

Ранее константа B определялась из условия $T_w(0) = T_w^0$, в данном случае требуется использовать тождество вида

$$T_w(x) = \frac{T_w^{cr} - C \cdot T_a^0}{1 - C}. \quad (5.76)$$

При $x > x^{cr}$ получается решение вида

$$T_w(x) = T_a^0 + \frac{T_a^{cr} - T_a^0}{1 - C} \cdot e^{\frac{c_a \cdot q_a}{c_w \cdot q_w} (1 - C) \cdot (\xi^{cr} - \frac{x}{L})}. \quad (5.77)$$

Температура воздуха в предположении, что выделение теплоты при конденсации идёт только на нагрев жидкости, а в нагреве воздуха участвует только обычный

теплообмен между теплоносителем и воздухом, вычисляется по формуле (5.11) усреднением $T_v^k(x)$ по всей длине теплообменника от 0 до L :

$$\overline{T_v^k(x)} = \frac{1}{L} \cdot \left(\int_0^{x^{cr}} T_v^k(x) \cdot dx + \int_{x^{cr}}^L T_v^k(x) \cdot dx \right). \quad (5.78)$$

Полученное выражение позволяет вычислять температуру воздуха в теплообменных аппаратах с учетом тепловыделений от фазовых переходов влаги.

5.2. Экспериментальные исследования характеристик теплообменных аппаратов

Для практического решения задачи оптимизации компоновки теплообменных аппаратов необходимо параметрическое обеспечение разработанных математических моделей.

Для этого был разработан экспериментальный исследовательский стенд, состоящий из 8 размещённых вертикально друг над другом теплообменных секций, состоящих из 12 рядов змеевиков, расположенных последовательно по ходу движения воздуха. В качестве змеевиков использована гофрированная стальная труба диаметром 15 миллиметров с толщиной стенки 0,3 миллиметра, которая специальным образом навивается в спиралевидный змеевик диаметром 120 миллиметров. Такая конструкция позволяет обеспечить высокую удельную поверхность теплообмена при малых габаритах конструкции. Например, в представленной секции 1 погонный метр змеевика состоит из 6,86 метров гофрированной стальной трубы, что обеспечивает 0,44 м² площади поверхности теплообмена, одного из важнейших показателей рекуперативных теплообменных аппаратов. Для сравнения гладкая стальная труба точно таких же геометрических характеристик имела бы площадь поверхности 0,33 м².

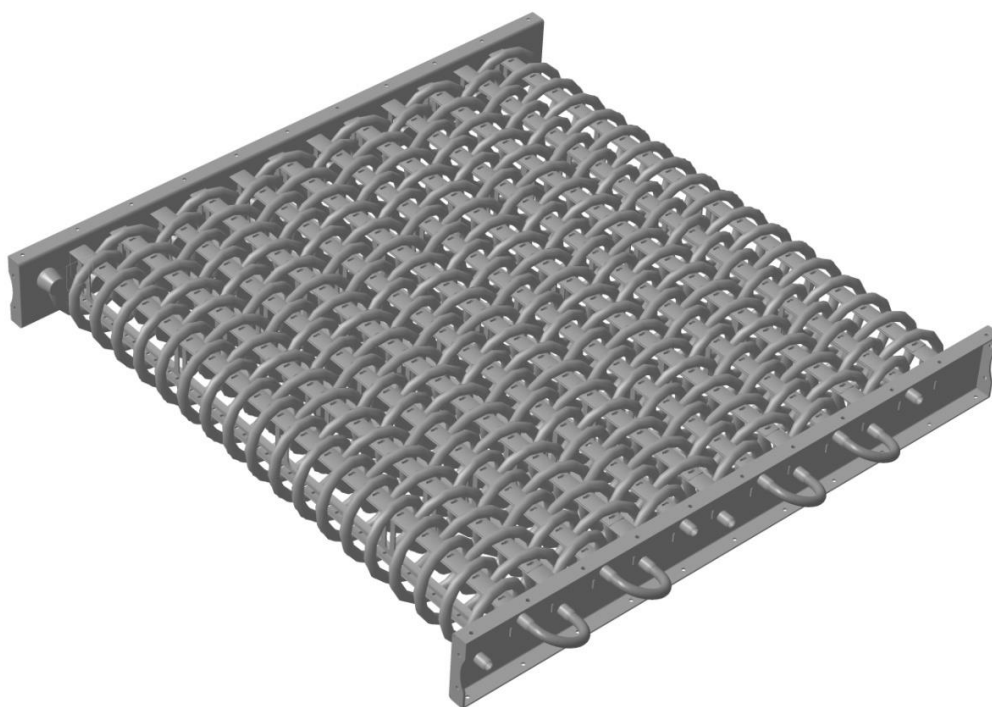


Рисунок 5.1 — Секция теплообменного аппарата из спиралевидных стальных трубок

На рисунке 5.2 представлен общий вид разработанного блока теплообменного аппарата. Для подачи воздуха через блок к нему был присоединён вентилятор ВМЭ-6 с преобразователем частоты для возможности изменения расхода воздуха.

Обвязка теплообменных трубок реализована в двух вариантах. Первый вариант — 8 секций теплообменного аппарата подключаются параллельно по воздуху и параллельно по воде, но все 12 рядом змеевиков в пределах одной секции запитаны последовательно как по воде, так и по воздуху. Второй вариант предполагал, что 12 змеевиков, расположенных последовательно по воздуху, по воде разбиваются на 2 группы по 6 штук, в каждой из которых змеевики подключаются параллельно по воде, но сами группы по воде подключаются последовательно.



Рисунок 5.2 — Стенд с блоком теплообменного аппарата

Для подачи теплоносителя теплообменный блок был подсоединен к тепловой магистрали, обеспечивающей давление воды на входе 0,4 МПа с температурой +75...+72 °С. Стенд оборудован манометрами давления воды на входе и выходе из теплообменного блока, а также расходомером. Температура воды измерялась с помощью пирометров Fluke 566. Все параметры воздушного потока (скорость движения, перепад давлений на входе и выходе, площадь поперечного сечения для расчета расхода, температура и относительная влажность) измерялись инструментально с помощью анемометра АПР-2, прецизионного барометра DPI-740, и термовлагомера Fluke 971. Была поставлена задача — в ходе экспериментальных исследований определить гидравлическую и аэродинамическую характеристики разработанного блока, удельный коэффициент теплопередачи и его зависимость от скоростей движения воздуха и воды. Для измерений использовались режимы подачи воздуха и воды через теплообменный аппарат, представленные в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 — Режимы испытаний по воздуху

Параметр	Режим № 1	Режим № 2	Режим № 3
Частота, Гц	50	35	20
Расход, м ³ /с	7,3	5,1	2,8
Скорость движения воздуха, м/с	0,73	0,51	0,28

Таблица 5.2 — Режимы испытаний по воде

Параметр	Вариант обвязки по воде			
	Вариант № 1		Вариант № 2	
Расход воды, м ³ /ч	1	1,6	1,2	2,2
Скорость течения воды в трубках, м/с	0,19	0,31	0,12	0,22

На первоначальной стадии было выполнено измерение аэродинамической характеристики разработанного теплообменного блока. Для этого в каждом режиме по воздуху произведены измерения перепада давлений. Результаты измерений с кривой аэродинамической характеристики представлены на рисунке 5.3.

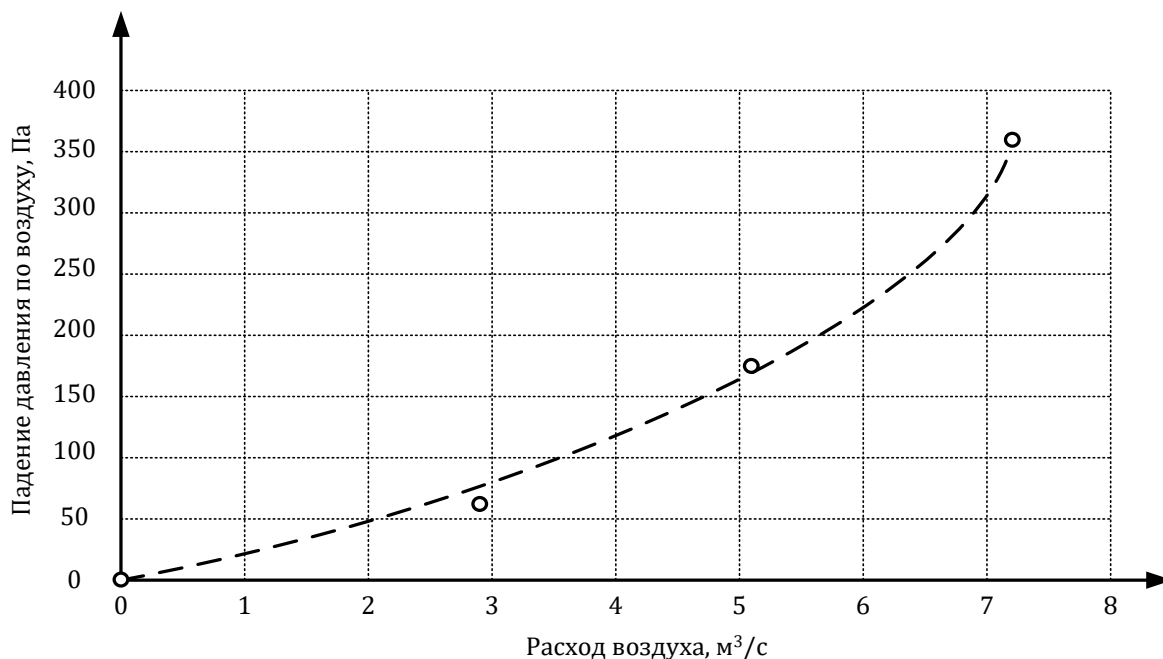


Рисунок 5.3 — Результаты измерений аэродинамических параметров теплообменного блока

На следующем этапе были выполнены измерения гидравлических характеристик теплообменного аппарата при различных схемах обвязки трубок. Результаты измерений представлены на рисунке 5.4. Полученные данные позволили вычислить гидравлическое сопротивление одной секции из 8-ми последовательно соединенных трубок, равное 2 140 Па/(м³/с)². Далее были измерены теплофизические характеристики теплообменного блока. Зависимость разницы температур воздуха на входе и выходе из теплообменного блока представлена на рисунке 5.5.

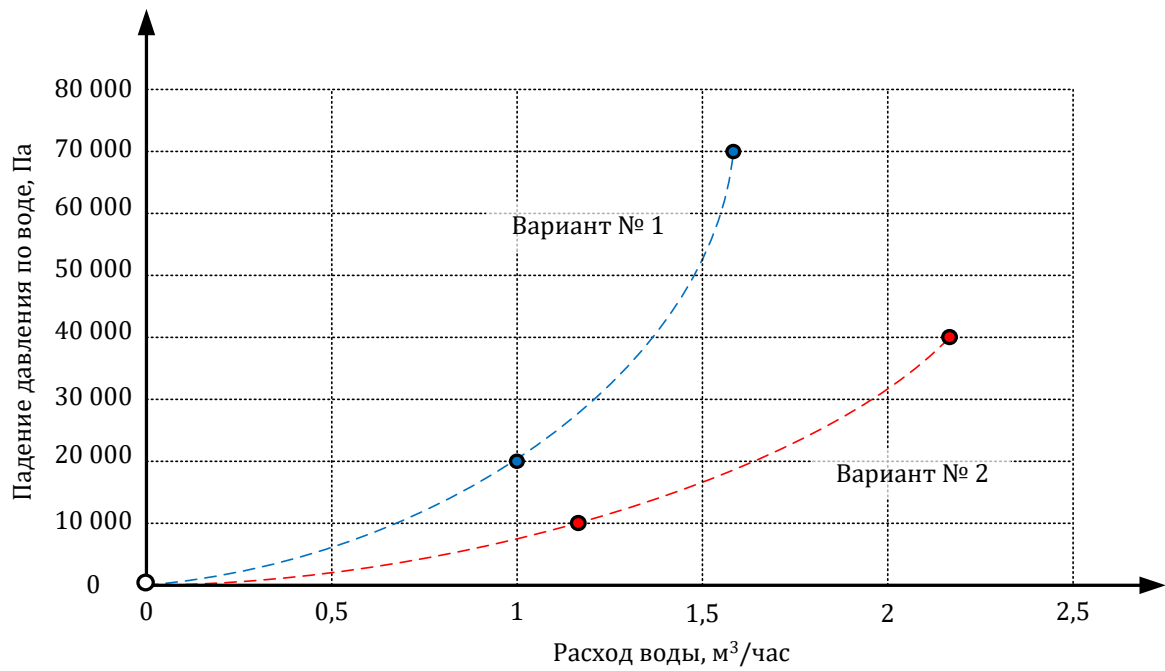


Рисунок 5.4 — Результаты измерений гидравлических параметров теплообменного блока

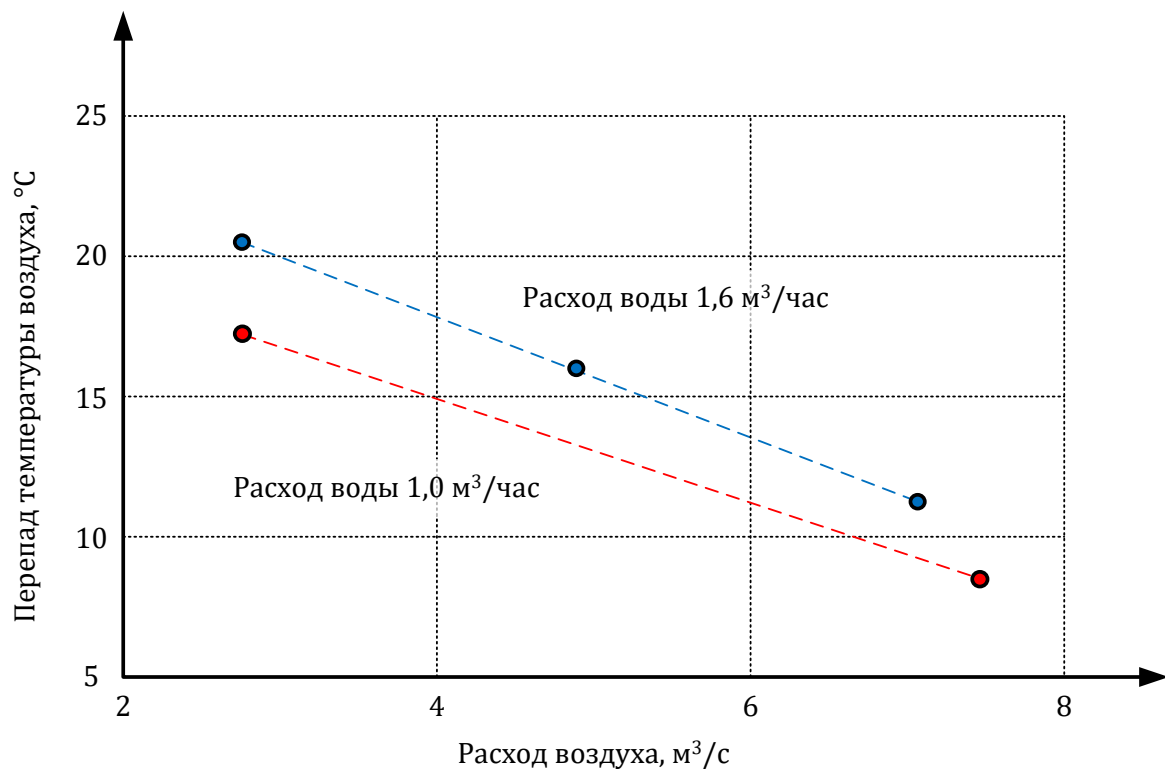


Рисунок 5.5 — Результаты измерений перепада температур воздуха на входе и выходе блока в зависимости от расхода воды и воздуха

При этом важно отметить, что измеренный перепад температур подвергался контрольной проверке измерениями по воде. Так, прирост теплосодержания в воздушном потоке сравнивался с убылью теплосодержания воды. В проведенных экспериментах разница между значениями не превышала 13 %, что свидетельствует о высокой точности выполненных измерений.

На рисунке 5.6 представлены рассчитанные значения тепловой мощности теплообменного блока, по которым построены интерполяционные тепловые характеристики системы.

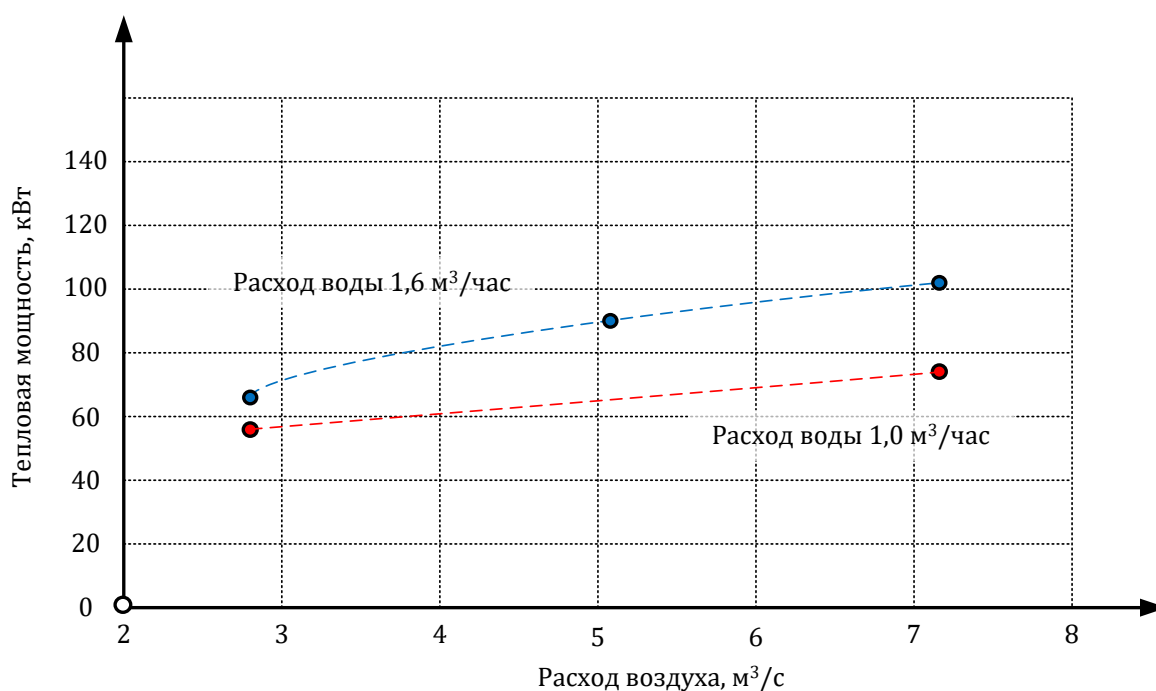


Рисунок 5.6 — Тепловая характеристика теплообменного блока

С помощью зависимостей расчета теплообменных аппаратов, полученных в разделе 5.1, с учетом схемы движения воздуха и теплоносителя в разработанном аппарате, построена его математическая модель, на которой выполнена калибровка значений коэффициента теплопередачи k — основной характеристики теплообмена рекуперативных теплообменных аппаратов. Коэффициент теплопередачи является комплексным параметром, учитывающим термическое сопротивление на преодоление трехслойной конструкции «пограничный слой «воздух — трубка», термическое сопротивление материала трубки и пограничный слой «трубка — теплоноситель»», и зависит от скоростей движения текучих сред, материала, формы и геометрических характеристик теплообменных трубок.

Для разработанного теплообменного аппарата получена следующая зависимость для коэффициента теплопередачи

$$k = a \cdot v^n \cdot w^r, \quad (5.79)$$

где a — эмпирический коэффициент, равный 25,5;

v — скорость движения воздуха, м/с;

w — скорость движения воды, м/с;

n — эмпирический коэффициент, равный 0,496;

r — эмпирический коэффициент, равный 0,16.

Для сравнения в таблице 5.3 указаны приведенные параметры коэффициента теплообмена различных теплообменных аппаратов.

Таблица 5.3 — Сравнение параметров теплопередачи различных теплообменных аппаратов

Тип теплообменника	a	n	r
КСК4-12	25,5	0,496	0,16
КСК4-11	25,5	0,496	0,16
КВС-10-П	25,5	0,496	0,16
КВС10А-ПУЗ	25,76	0,32	0,132
КВС11А-ПУЗ	25,76	0,32	0,132
КШР-350	30	0,71	0,12

Из полученных результатов следует, что наряду с высокими эксплуатационными характеристиками, разработанная конструкция теплообменного аппарата обладает удельным коэффициентом теплообмена, больше традиционных теплообменных аппаратов систем воздухоподготовки.

Полученная зависимость использована для параметрического обеспечения математических моделей расчета теплообменных аппаратов, что позволило перейти к решению задачи оптимизации компоновки теплообменного аппарата.

5.3. Разработка высокоэффективного теплообменного аппарата для подземных передвижных систем кондиционирования воздуха

Следующей задачей являлась разработка нового теплообменного аппарата для условий горных выработок рудника, удовлетворяющего следующему набору требований: малые габариты (для размещения в горных выработках горизонта ведения очистных работ), мобильность (для возможности перемещения за интенсивно движущимся фронтом горных работ), устойчивость к агрессивной среде (рудничный воздух содержит соединения серы и аммиака). С учетом этих требований на основе применения специальных гофрированных теплообменных трубок из нержавеющей стали и много-

вариантного моделирования различных компоновок разработан рекуперативный теплообменный аппарат.

5.3.1. Оптимизация компоновки теплообменных модулей

На первом этапе разработки теплообменного аппарата была решена задача оптимизации компоновки теплообменных модулей. Решение задачи позволило при заданных технических параметрах и ограничениях подобрать конфигурацию теплообменных трубок и их гидравлической обвязки, которые обеспечивали бы максимальную тепловую мощность теплообменника при заданных аэродинамических характеристиках.

В таблице 5.4 представлены расчётные результаты эффективности работы охлаждающей установки в зависимости от начальной относительной влажности воздуха и компоновки теплообменников относительно подачи воздуха.

В качестве требуемых технических параметров были приняты следующие значения. Расход охлаждаемого воздуха $10 \text{ м}^3/\text{с}$ с начальной температурой $+30 \text{ }^\circ\text{C}$, расход хладоносителя $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ с начальной температурой $-1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача оптимизации решена методом вариантов. Рассмотрены 4 варианта компоновки:

1. Все 12 рядов теплообменников подключены последовательно, направления движения воздуха и жидкости совпадают.
2. Все 12 рядов теплообменников подключены последовательно, направления движения воздуха и жидкости противоположны.
3. Подача антифриза делится пополам на 1-6 ряды и 7-12 ряды, направления движения воздуха и жидкости совпадают.
4. Подача антифриза делится пополам на 1-6 ряды и 7-12 ряды, направления движения воздуха и жидкости противоположны.

Результаты расчета приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 — Расчётные значения температуры охлаждённого воздуха в зависимости от начальной относительной влажности

Вариант компоновки	Относительная влажность				
	0 %	40 %	60 %	80 %	100 %
№ 1	+14.6	+14.6	+15.9	+17.7	+18.4
№ 2	+14.3	+14.3	+16.4	+16.6	+17.2

Вариант	Относительная влажность				
	№ 3	+15.4	+15.4	+15.5	+16.8
№ 4	+15.2	+15.2	+15.6	+16.5	+17.8

Из полученных результатов следует, что при заданном соотношении расходов воздуха и охлаждающей жидкости разные направления их подачи дают более интенсивный теплообмен для сухого и влажного воздуха. Для воздуха средней влажности наблюдается обратный эффект, вызванный, очевидно, тем, что выпадение влаги с выделением теплоты при разнонаправленном движении воздуха и антифриза наступает раньше, чем при сонаправленном. Разделение подачи антифриза в начало и центр охлаждающей системы также улучшает теплообмен только для воздуха средней влажности по той же причине — более позднего наступления процесса конденсации влаги при более медленном движении жидкости.

В соответствии с результатами проведённых исследований следующие правила компоновки теплообменников позволяют добиться максимальной интенсивности теплообмена между воздухом и жидкостью:

- противоположная подача воды в системах обогрева воздуха с последовательным подключением всех теплообменных секций;
- противоположная подача хладоносителя в системах охлаждения сухого или близкого к насыщению влажного воздуха с последовательным подключением всех теплообменных секций;
- разделение подачи антифриза в начало и центр охлаждающей системы для воздуха средней влажности.

Оптимальная конфигурация подключения теплообменных модулей произвольного типа в общем случае определялась на основании предварительных расчётов в соответствии с разработанной моделью теплообмена, не использующей усреднённых характеристик.

5.3.2. Разработка конструктивных решений

Конструктивно разработанное оборудование представляет собой рекуперативный теплообменный аппарат с комбинацией перекрестной и противоточной схем движения воздуха и хладоносителя. Новым в предложенной конструкции является применение гофрированных стальных труб для змеевиков малого радиуса навивки, образующих отдельную секцию теплообменного устройства.

Кроме того, примененная гофрированная труба из нержавеющей стали SUS 304 (08X18H10) имеет большое максимальное рабочее гидравлическое сопротивление 1,5 МПа, допустимый радиус изгиба 45 миллиметров, и диапазон рабочих температур от -30 °С до +150 °С, а применение нержавеющей стали в качестве материала позволяет обеспечивать высокую коррозионную устойчивость к агрессивным шахтным средам, даже в условиях атмосферы, насыщенной сернистыми соединениями и солями.

Секции образуют блочную конструкцию теплообменного аппарата, что обеспечивает отличительную многовариантность схем подключения секций по движению хладоносителя и нетрудоемкую замену секций.

При использовании теплообменного аппарата в качестве воздухоохладителя в конструкцию между блоками легко могут быть включены каплеуловители для улавливания и сбора капельной влаги, конденсирующейся из воздуха в процессе его охлаждения.

На рисунке 5.7 приведена трехмерная модель разработанного образца теплообменного аппарата.

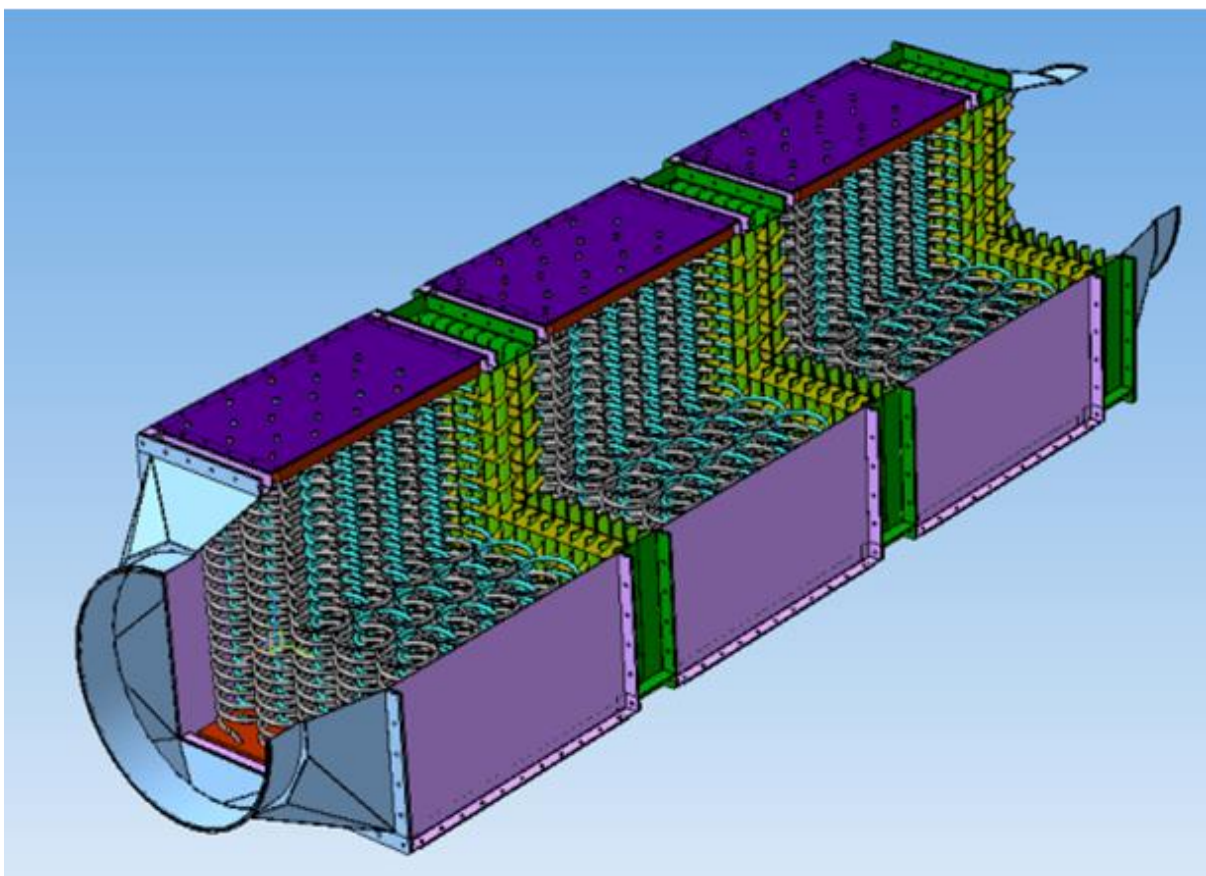


Рисунок 5.7 — Модель разработанного теплообменного аппарата

Еще одной важной особенностью разработанного аппарата является многовариантность подключения секций и блоков по воде, что позволяет значительно изменять его гидравлическую и тепловую характеристики.

В результате наиболее важной особенностью является то, что при одинаковых эксплуатационных характеристиках удельный на единицу площади коэффициент теплопередачи выше альтернативных зарубежных аналогов [5,70].

Для оценки равномерности распределения воздуха внутри теплообменного аппарата и эффективности использования поверхности теплообмена, проведены численные эксперименты с использованием CFD-моделирования в программном комплексе ANSYS. Результаты расчета распределения скорости воздушного потока при течении внутри теплообменного аппарата представлены на рисунке 5.8.

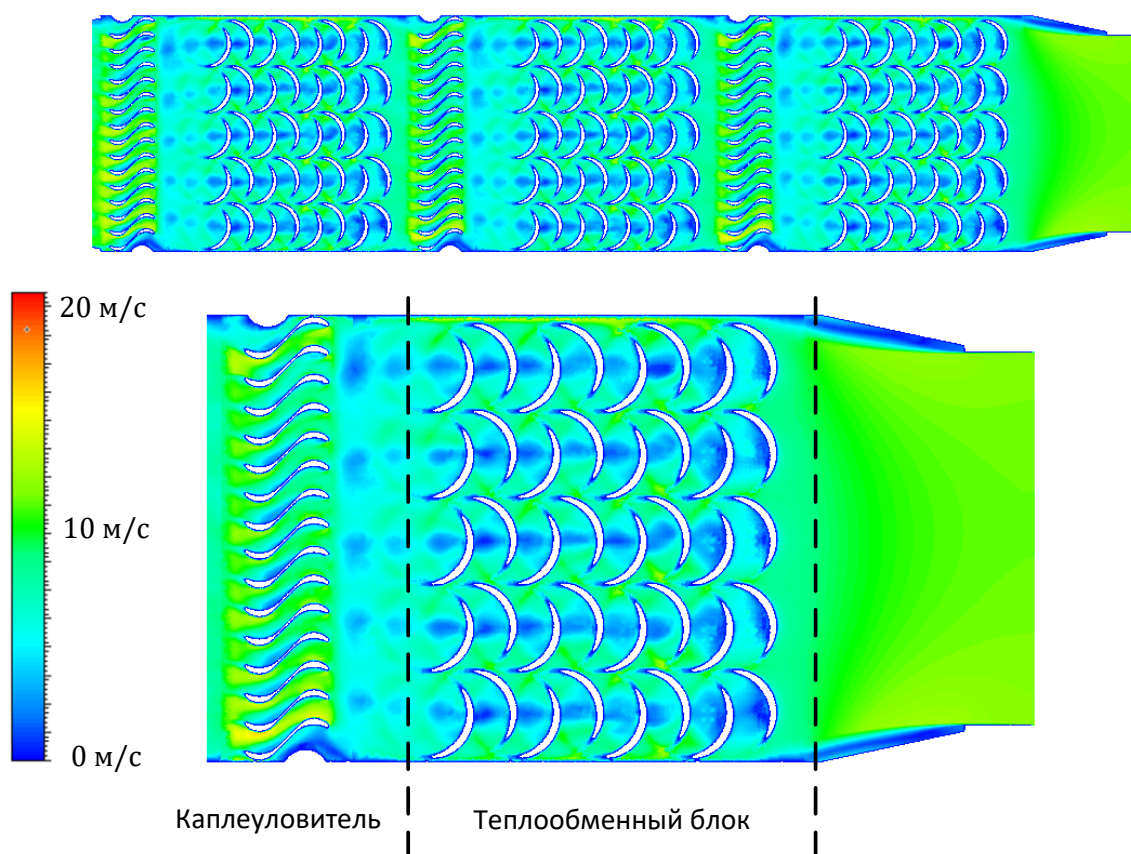


Рисунок 5.8 — Распределение поля скоростей внутри теплообменного аппарата в пределах каплеуловителей и теплообменных блоков

CFD-моделирование позволило не только выполнить альтернативный расчет тепловых и аэродинамических характеристик аппарата, но обеспечить подбор и проверку скоростей движения воздуха через систему каплеуловителей. Это связано с тем,

что в современных малогабаритных каплеуловителях эффективное улавливание капель происходит на скоростях, не превышающих 10 м/с.

Использование разработанного оборудования позволяет уменьшить габариты теплообменных аппаратов за счет увеличения интенсивности теплообмена и обеспечить надежность работы в условиях рудничной атмосферы высокой запыленности и загазованности.

Важным эксплуатационным достоинством является то, что представленная конструкция легко поддается очистке и ремонту в условиях подземных горных выработок.

На рисунке 5.9 представлен разработанный воздухоохладитель подземной системы кондиционирования воздуха КШР-350Н, представляющий собой рекуперативный теплообменный аппарат с сочетанием перекрестного и противоточного движения хладоносителя и воздуха.



Рисунок 5.9 — Воздухоохладитель подземной системы кондиционирования КШР-350Н

Разработанный воздухоохладитель показал высокие показатели теплопередачи в качестве элемента системы кондиционирования КШР-350Н и успешно прошёл шахт-

ные испытания. Измеренный удельный коэффициент теплопередачи составил 143 Вт/м²·°С, что превышает зарубежные аналоги на 19 %.

5.4. Выводы

На основе проведенных исследований, направленных на разработку высокоэффективных теплообменных аппаратов, можно сделать следующие выводы:

- существующие теплотехнические методы расчета теплообменных установок не позволяют рассчитывать процессы тепломассообмена в однорядных теплообменных установках при больших площадях теплообмена и различных вариантах движения теплоносителя и воздушной среды (перекрестного, однонаправленного и противоположно направленного);
- расчет процессов охлаждения воздушной среды в рекуперативных теплообменных аппаратах с необходимостью должен учитывать влияние теплоты фазового перехода испарения и конденсации влаги;
- установлено, что наиболее эффективно процесс охлаждения воздуха протекает при выполнении следующих условий: противоположная подача воды в системах обогрева воздуха с последовательным подключением всех теплообменных секций; противоположная подача хладоносителя в системах охлаждения сухого или близкого к насыщению влажного воздуха с последовательным подключением всех теплообменных секций; разделение подачи антифриза в начало и центр охлаждающей системы для воздуха средней влажности;
- оптимальная конфигурация подключения теплообменных модулей произвольного типа в общем случае определяется на основании предварительных расчётов в соответствии с моделью теплообмена, не использующей усреднённых характеристик.

Выполненные исследования и технологические решения позволяют разрабатывать новые высокоэффективные теплообменные аппараты, являющиеся важными элементами систем кондиционирования воздуха. В частности, на основе выполненных экспериментальных и теоретических исследований разработан теплообменный аппарат системы кондиционирования КШР-350Н, обеспечивающий удельный коэффициент теплопередачи 143 Вт/м²·°С, что превышает лучшие зарубежные аналоги на 19 %

Однако какими бы эффективными ни были характеристики отдельного теплообменного аппарата, необходимо определение их рационального размещения и парамет-

ров оптимальной холодильной мощности в сети подземных горных выработок. Решению данного вопроса посвящен следующий раздел работы.

6. РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ И ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТКАХ

В разделе описаны постановка и решение задачи оптимизации размещения и параметров воздухоохладителей в горных выработках, а также ресурсосберегающие технологические схемы кондиционирования для двух широко применяемых вариантов систем разработки — систем разработки с короткими очистными забоями (включающими варианты проходческих забоев) и систем разработки с длинными очистными забоями. В заключении главы приведены результаты испытания разработанной подземной системы кондиционирования воздуха в условиях глубоких залежей рудника «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

6.1. Оптимизация мест установки и параметров воздухоохладителей в сети подготовительных и очистных выработок

Как уже было показано при исследовании процессов формирования теплового режима, в подготовительных и очистных горных выработках происходит интенсивный теплообмен воздуха с массивом горных пород, воздух принимает естественную температуру горных пород, и далее происходит его дополнительный нагрев от техногенных источников тепловыделения. И это происходит вне зависимости от предварительного охлаждения общей входящей струи воздуха на поверхности или в главных воздухоподающих выработках. В связи с этим возникает задача эффективного местного охлаждения воздуха непосредственно в подготовительных и очистных горных выработках, где находится основное количество рабочих зон с постоянным пребыванием персонала. При этом задача важна вне зависимости от системы хладоснабжения шахты и актуальна как для поверхностных, так и подземных холодильных машин как центрального, так и местного типа.

В целом задача оптимального размещения воздухоохладителей в горных выработках не является новой. Однако имеющиеся в этом направлении разработки сводятся к решению задачи оптимизации размещения воздухоохладителей и определения их холодильной мощности вдоль одной нагретой горной выработки таким образом, чтобы обеспечить на всем ее протяжении требуемую температуру воздуха [163,164]. В действительности же для глубоких шахт и рудников постановка задачи требует корректировки. В частности, согласно требованиям нормативных документов, вентиляция подземных рабочих зон должна быть организована обособленно. И отдельные участки

горных выработок, требующие кондиционирования воздуха, представляют собой параллельных потребителей воздуха и холодильной мощности.

Схематично описанную схему распределения воздуха можно представить так, как это изображено на рисунке 6.1.

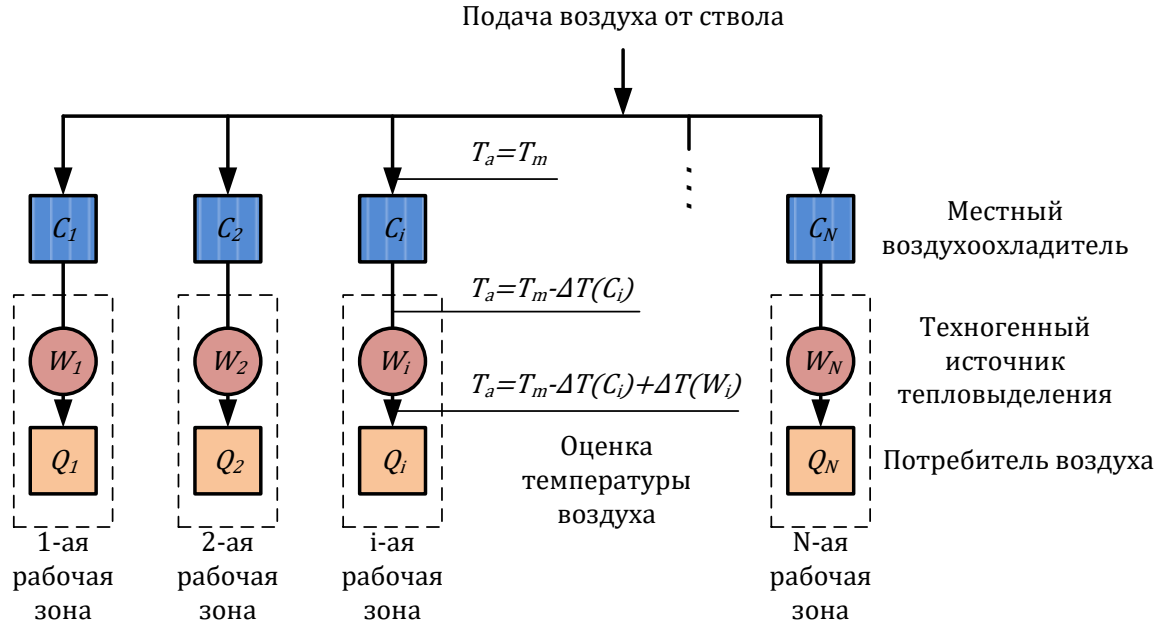


Рисунок 6.1 — Схема к задаче оптимизации мест размещения и мощности воздухоохладителей

На рисунке схематично представлена структура отдельных потребителей воздуха в руднике и формирование микроклиматических параметров в рабочих зонах с учетом наличия местных воздухоохладителей. Согласно схеме, температура воздуха непосредственно перед *i*-ой рабочей зоной определяется выражением

$$T_{ai} = T_{mi} - \frac{H_i}{c_a \cdot \rho_a \cdot Q_i} + \frac{W_i}{c_a \cdot \rho_a \cdot Q_i}, \quad (6.1)$$

где T_{mi} — температура нетронутого массива горных пород на глубине *i*-ой рабочей зоны, °С;

H_i — холодильная мощность местного воздухоохладителя, кВт;

c_a — теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С;

ρ_a — плотность воздуха, кг/м³;

W_i — мощность техногенного источника тепловыделения, кВт.

Температура в рабочей зоне не должна превышать максимально допустимого значения, то есть должно выполняться условие

$$T_{ai} = T_r. \quad (6.2)$$

Подставляя в неравенство (6.2) формулу (6.1), и выражая из него мощность местного воздухоохладителя, получим следующее выражение

$$H_i = W_i + (T_{mi} - T_r) \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot Q_i. \quad (6.3)$$

Полученное выражение имеет простой физический смысл — холодильная мощность местного воздухоохладителя должна быть не меньше мощности источника тепловыделений на участке с учетом компенсации дополнительных теплоизбытков от нагретого массива горных пород.

Выражение (6.3), справедливое для отдельной рабочей зоны, позволяет определить суммарную холодильную мощность всех местных воздухоохладителей, взяв их сумму

$$H = \sum_{i=1}^N W_i + \sum_{i=1}^N (T_{mi} - T_r) \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot Q_i. \quad (6.4)$$

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

Вид выражения (6.4) предполагает следующие выводы, которыми следует руководствоваться при минимизации суммарной мощности местных воздухоохладителей:

- необходимо обоснование максимально возможного допустимого значения температуры воздуха с учетом температурно-влажностных условий и индивидуальных особенностей шахты или рудника;
- необходима подача в рабочие зоны строго расчетного количества воздуха и обоснование снижения подачи избыточных объемов воздуха на проветривание рабочих зон.

Первый вопрос будет подробно рассмотрен в разделе 7.1, где предложена система нормирования микроклиматических условий таким образом, чтобы исключить необоснованные запасы в плане нормирования температуры сухого воздуха и учесть влияние скорости движения и относительной влажности воздуха.

Второй вопрос связан с перераспределением количества охлаждаемого воздуха строго по потребителям. При этом чем больше воздуха мы охлаждаем, тем большая холодильная мощность требуется. По этой причине проблемы, связанные с подачей

большого количества воздуха и его недостаточным перераспределением, влекут за собой увеличение требуемых холодильных мощностей. Поэтому задачей является разработка технических решений и рациональных схем распределения холодильных мощностей по отдельным рабочим зонам. Однако этот вопрос тесно связан с индивидуальными технологическими особенностями шахты или рудника. Поэтому в следующем разделе работы представлены технологические схемы местного кондиционирования воздуха, разработанные для двух наиболее широко применяемых вариантов систем разработки — систем разработки с короткими очистными забоями (включающими варианты проходческих забоев) и систем разработки с длинными очистными забоями.

6.2. Разработка ресурсосберегающих технологических схем локального кондиционирования воздуха

В разделе представлены с учетом разработанных принципов оптимизации мест установки и параметров охладителей оптимальные технологические схемы локального кондиционирования воздуха применительно к системам разработки с длинными очистными забоями и короткими забоями, характерными для многих широко применяемых камерных систем разработки и строящихся горных выработок.

6.2.1. Системы разработки с длинными очистными забоями

Существующие способы нормализации микроклиматических параметров воздуха в лавах заключаются в применении подземных воздухоохладителей в подготовительных воздухоподающих выработках [1,185] или использовании теплоизоляции воздуха от нагретых горных пород [7].

За основу разработки принят способ кондиционирования воздуха в выработках выемочного участка глубокой шахты [1], заключающийся в охлаждении воздуха в воздухоподающей выработке и в лаве, отсасывании утечек воздуха из выработанного пространства, их охлаждения и отвода по трубопроводу за пределы выемочного участка. Охлаждение утечек производят за пределами выемочного участка до предельно допустимой для выработок с исходящей вентиляционной струей температуры, причем трубопровод для отвода утечек выполняют теплоизолированным.

При разработке предлагаемого способа основной задачей, согласно выработанному принципу оптимизации, являлось повышение эффективности кондиционирования воздуха и охлаждения технологических сред оборудования при добыче полезных иско-

паемых длинными очистными забоями за счет их отдельного охлаждения с помощью системы кондиционирования.

На первоначальном этапе требуется определение места охлаждения воздуха в подготовительной выработке. Для обоснования места охлаждения воздуха выполнены расчеты требуемой холодопроизводительности воздухоохладителя при его размещении на различных удалениях от лавы. Результаты расчета представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 — Результаты расчета требуемой холодопроизводительности установки в зависимости от места размещения воздухоохладителя

Вариант	Расстояние от воздухоохладителя до лавы, м	Требуемая холодопроизводительность для охлаждения воздуха до +26 °С, кВт
Воздухоохладитель располагается на энергопоезде	50	100
Воздухоохладитель располагается между энергопоездом и технологической сбойкой	250	150
Воздухоохладитель располагается на сопряжении с технологической сбойкой	500	200

С помощью проведенных расчетов установлено, что наиболее эффективным местом размещения воздухоохладителя с точки зрения минимизации требуемой холодопроизводительности системы является энергопоезд.

Существующий способ кондиционирования воздуха в лавах характеризуется низкой эффективностью охлаждения воздуха из-за тепловых потерь, происходящих при движении воздушной струи по горным выработкам в условиях высоких температур окружающего породного массива. Традиционно эта проблема решается установкой дополнительных воздухоохладителей по пути движения воздуха и оптимизацией их размещения.

Зачастую дополнительной задачей кондиционирования воздуха является отведение тепловыделений от работающего оборудования, что чаще всего осуществляется в их отведении в рудничную атмосферу. В то же время, при перераспределении охлажденного системой кондиционирования воздуха по выработкам или внутри выработок, может сложиться ситуация с недостаточным охлаждением оборудования — например, когда охлажденного воздуха подводится недостаточно или он успел уже нагреться.

Эта проблема решается использованием комбинированного теплообменного аппарата, который устанавливается в воздухоподающей выработке, при этом в отдельном теплообменном элементе, расположенным как можно ближе к лаве, осуществляется теплообмен между хладоносителем и нагретой воздушной струей, поступающей в забой, и параллельно в другом теплообменном элементе происходит теплообмен между хладоносителем и средой, охлаждающей комбайновый комплекс.

После обобщения предложенных принципов предлагается следующая технологическая схема системы кондиционирования воздуха в длинных очистных забоях. В сдвоенный теплообменный аппарат отдельного охлаждения подают охлажденный в холодильной машине хладоноситель, который параллельно подают и для охлаждения воздушной среды, и для отведения тепловыделений от оборудования. За счет теплообменных процессов осуществляется теплообмен и хладоноситель нагревается. Затем по циркуляционному контуру нагретый хладоноситель подают в холодильную машину. В ходе работы холодильной машины происходит теплопередача от нагретого хладоносителя к охлажденному в следующем циркуляционном контуре. По этому контуру нагретый теплоноситель подают в теплообменный аппарат для сброса теплоты в исходящую из длинного очистного забоя струю воздуха. В результате хладоноситель охлаждается и повторно подается к холодильной машине для снятия избыточных тепловыделений.

Описанная технологическая схема системы кондиционирования воздуха и охлаждающих сред представлена на рисунке 6.2. Система включает:

- комбинированный теплообменный аппарат, который представляет собой два или более теплообменников, каждый из которых предназначен для отдельного охлаждения воздуха и технологических сред;
- циркуляционный контур «комбинированный теплообменный аппарат — холодильная машина» с хладоносителем;
- холодильную машину;
- циркуляционный контур «холодильная машина — воздушный охладитель хладоносителя» с теплоносителем;
- воздушный охладитель хладоносителя для сброса теплоты.

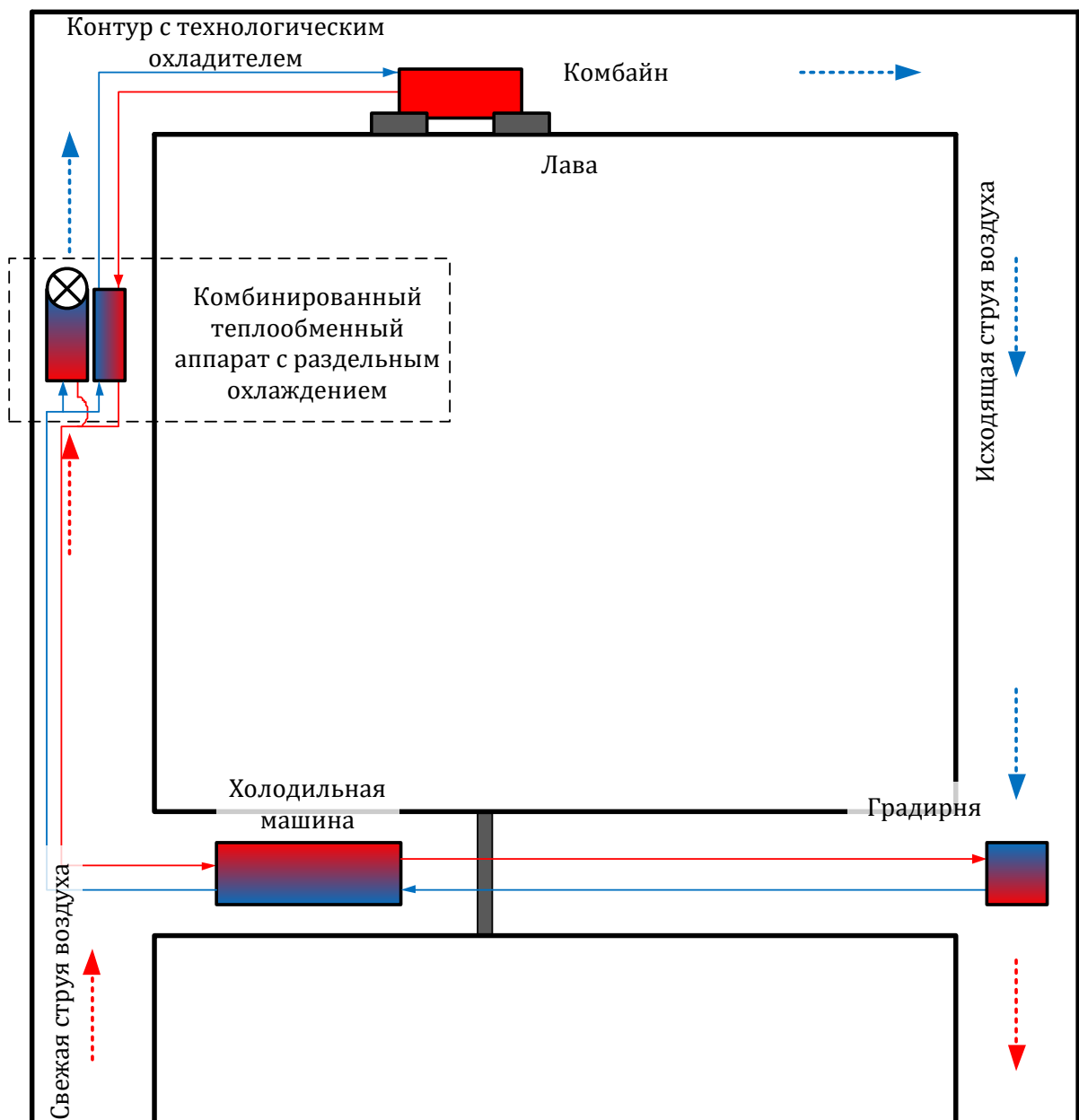


Рисунок 6.2 — Схема ресурсосберегающей системы кондиционирования воздуха для длинных очистных забоев

Эффективность работы предлагаемой системы кондиционирования воздуха обеспечивается независимым использованием хладоносителя для кондиционирования воздуха и охлаждения рабочей среды оборудования за счет применения комбинированного теплообменного аппарата раздельного охлаждения, принципиальная схема которого и эпюры охлаждения воздуха, технологической среды и хладоносителя приведены на рисунке 6.3.

При движении фронта очистных работ разработанная система предусматривает возможность уменьшения длины циркуляционного контура в системе «холодильная машина — сдвоенный теплообменный аппарат раздельного охлаждения».

Преимуществами предлагаемой системы кондиционирования являются:

- независимое кондиционирование воздуха обеспечивает исключение переохлаждения воздушной среды, снижения эффективности кондиционирования из-за конденсации влаги;
- независимое охлаждение технологической среды оборудования снижает вероятность нарушения температурного режима работы двигателей;
- замкнутость технологического процесса охлаждения приводит к отсутствию необходимости во внешних хладоносителях.

Графики изменения температуры воздуха, технологического теплоносителя и хладоносителя системы кондиционирования приведены на рисунке 6.3.

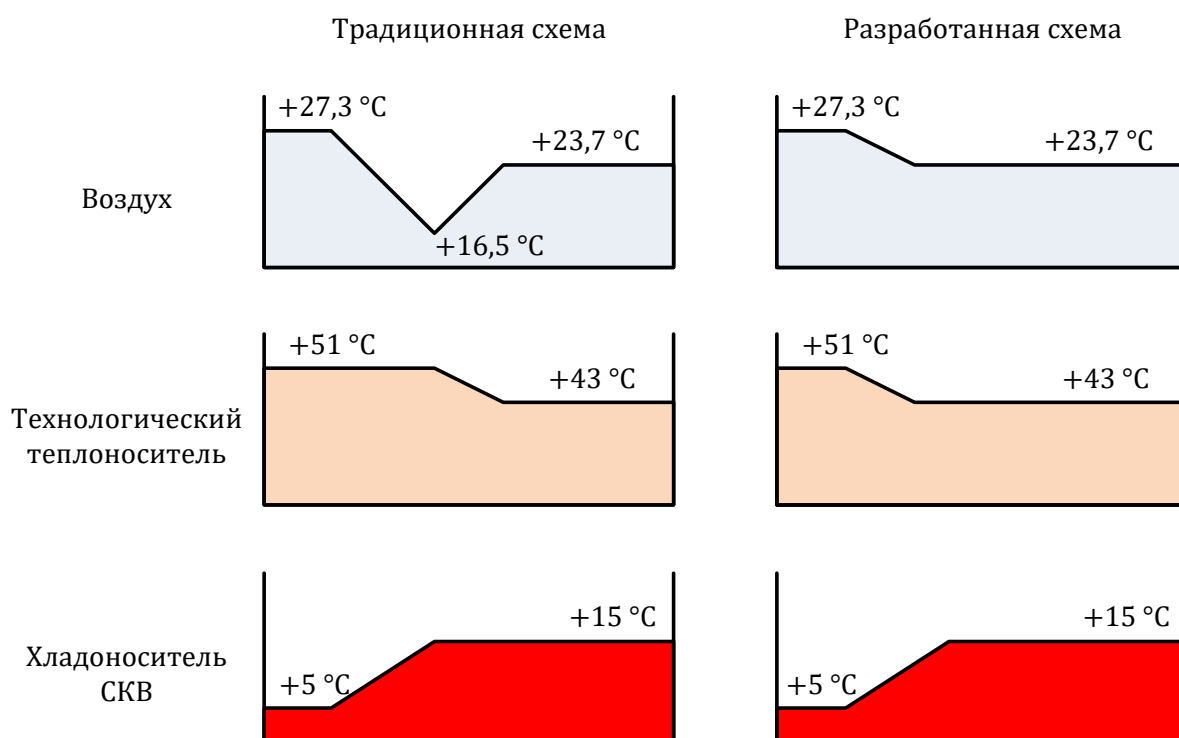


Рисунок 6.3 — Сравнение традиционного и предлагаемого способов охлаждения воздуха и технологического теплоносителя

На разработанную систему кондиционирования воздуха в длинных очистных забоях получен патент на изобретение № 2509895 «Способ кондиционирования воздуха и охлаждения технологических сред оборудования при добыче полезных ископаемых подземным способом» [122].

6.2.2. Проходческие забои и системы разработки с короткими очистными забоями

Для построения ресурсосберегающей технологической схемы кондиционирования воздуха в проходческих и коротких очистных забоях разработана тепловая модель типового горизонта ведения очистных работ при применении камерных и слоевых систем разработки рудных месторождений (см. рисунок 6.4). Использование тепловой модели позволяет промоделировать и рассмотреть эффективность следующих вариантов распределения охлажденного воздуха в рамках местного кондиционирования рудничной атмосферы:

- локальное кондиционирование воздуха в месте расположения кондиционера;
- распределенная подача воздуха в тупиковые выработки.

Для прогнозирования теплового режима рабочих зон при локальном кондиционировании воздуха произведено моделирование термодинамических процессов в пределах подсечного горизонта шахты.

Моделирование теплораспределения осуществлялось с использованием разработанных в главе 2 математических моделей, реализованных в программном модуле «Теплофизика», интегрированном в АК «АэроСеть».

В первом варианте весь охлаждаемый кондиционером воздух выдается в месте его установки. После чего охлажденная струя воздуха смешивается с попутным воздухом и подается в рабочие зоны.

Результаты моделирования спустя 3 суток с момента запуска системы кондиционирования воздуха при холодопроизводительности кондиционера равной 350 кВт приведены на рисунке 6.4.

Во втором варианте предполагалось, что весь охлажденный воздух в равных пропорциях подводится к ВМП, после чего подается в забой.

Результаты моделирования теплораспределения в горных выработках по истечению 3 суток с момента запуска системы кондиционирования с учетом распределенной подачи охлажденного воздуха представлены на рисунке 6.5.

Полученные результаты показывают, что как выработки сквозного проветривания, так и тупиковые забои охлаждены глубже, чем в первом варианте, и достаточно — температура воздуха не превышает +26 °С.

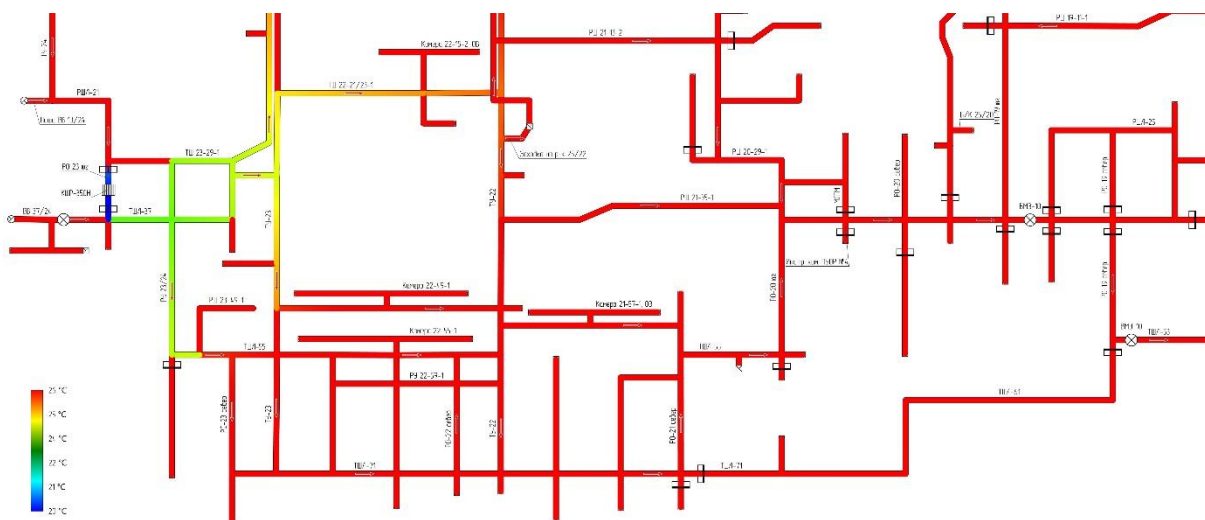


Рисунок 6.4 — Распределение температуры воздуха на участке подсечного горизонта шахты для варианта локального охлаждения воздуха (цвет, отличный от красного, показывает зону эффективности установки)

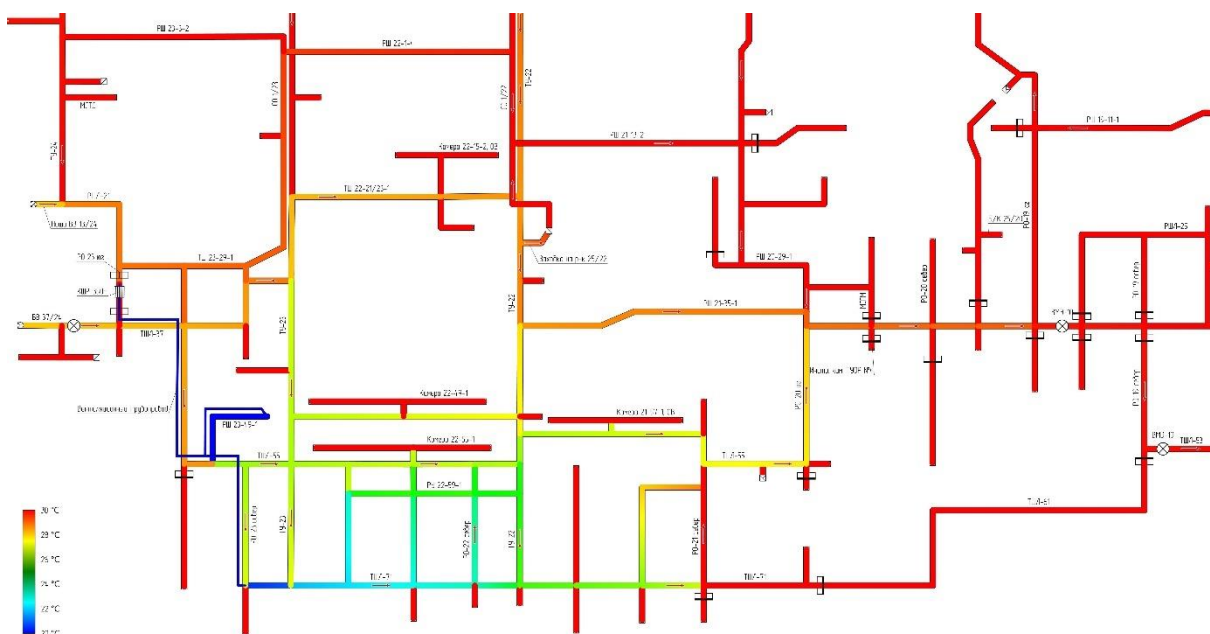


Рисунок 6.5 — Распределение температуры воздуха на участке подсечного горизонта шахты для варианта распределенной подачи охлажденного воздуха в РЗ (цвет, отличный от красного, показывает зону эффективности установки).

Однако эффективное охлаждение воздуха для данного варианта кондиционирования возможно только при хорошо организованных подаче и перераспределении воздуха, поступающего на проветривание тупиковых забоев (забираемого ВМП) и выработку сквозного проветривания. В качестве технических средств для перераспределения охлажденного воздуха в тупиковые забои предлагается использовать камеры смешения с шиберной заслонкой, регулирующей подачу охлажденного воздуха из воздуховода распределенной подачи, идущего от кондиционера, к вентилятору местного проветри-

вания. При этом охлажденный воздух смешивается с воздухом выработки в пропорции, обеспечивающей приемлемую температуру смеси.

По результатам моделирования наблюдается эффективное охлаждение рабочих зон за счет организованной подачи воздуха при помощи вентиляционного трубопровода и воздухораспределительного устройства. Это объясняется снижением общих холодопотерь вентиляционной струи в нагретый массив горных пород.

На основании выполненного моделирования составлена сравнительная таблица результатов нормализации микроклиматических параметров воздуха в рабочих зонах с учетом различных способов распределения охлажденного воздуха.

Таблица 6.2 — Результаты расчета температуры воздуха в рабочих зонах при различных холодопроизводительностях системы кондиционирования и вариантах распределения охлажденного воздуха

Показатель	Локальное охлаждение	Распределенная подача
Холодопроизводительность системы, кВт	350	350
Температура воздуха, поступающего в кондиционер, °С	28,9	28,9
Температура воздуха на выходе из кондиционера, °С	17,0	17,0
Температура воздуха в рабочей зоне тупиковой выработки (РШ 23-49-1), °С	24,9	20,5
Температура воздуха в рабочей зоне сквозной выработки (ТШЛ-71), °С	25,5	21,2

Отдельного решения требует вопрос отведения избыточных тепловыделений. Существующие способы кондиционирования воздуха при разработке рудных месторождений предполагают использование стационарной холодильной машины, обеспечивающей хладоносителем нестационарные воздухоохладители, располагаемые непосредственно на участках ведения горных работ [102,103,211,98]. Отведение же избыточных тепловыделений от холодильной машины осуществляется с помощью градирен в исходящую вентиляционную струю либо в атмосферу на поверхности. Недостатком такого подхода является необходимость строительства отдельной разветвленной сети циркуляционных трубопроводов с хладоносителем, обеспечивающим передачу теплоты от нестационарных воздухоохладителей до холодильной машины. Так, при работе в цикле оборотного водоснабжения кондиционеры комплектуются водоохладительными

модулями, предназначенными для размещения их в выработках с исходящей струей воздуха. Это приводит к значительному усложнению технологии кондиционирования воздуха, необходимости организации дополнительных циркуляционных контуров в сети горных выработок. Кроме того, от эффективности работы водоохладительных модулей зависит эффективность кондиционирования воздуха в целом, что снижает надежность работы всей системы.

Исключить указанные недостатки и обеспечить эффективное охлаждение воздуха на участках ведения очистных работ можно за счет использования технического трубопровода в шахте для отведения избыточных тепловыделений непосредственно в месте установки холодильной машины системы кондиционирования. Для этого в качестве технологического трубопровода может быть использован противопожарный трубопровод.

С учетом этой идеи и разработанных принципов предложен вариант мобильной системы кондиционирования воздуха, представленный на рисунке 6.6. Она состоит из следующих агрегатов, располагаемых на мобильной колесной основе: холодильная машина 2, агрегат подачи 3 нагретого воздуха 1 и воздухоохладитель 4, при этом холодильная машина 2 посредством трубопроводов 5 подключена к теплообменным аппаратам воздухоохладителя 4 и посредством трубопровода 7 к подземному техническому трубопроводу 6 подачи хладоносителя (например, воды противопожарного трубопровода).

Эти элементы объединяются в следующие блоки:

- холодильную машину;
- агрегат подачи воздуха, оборудованный вентилятором;
- теплообменный аппарат (воздухоохладитель).

Схема работы системы представлена на рисунке 6.6.

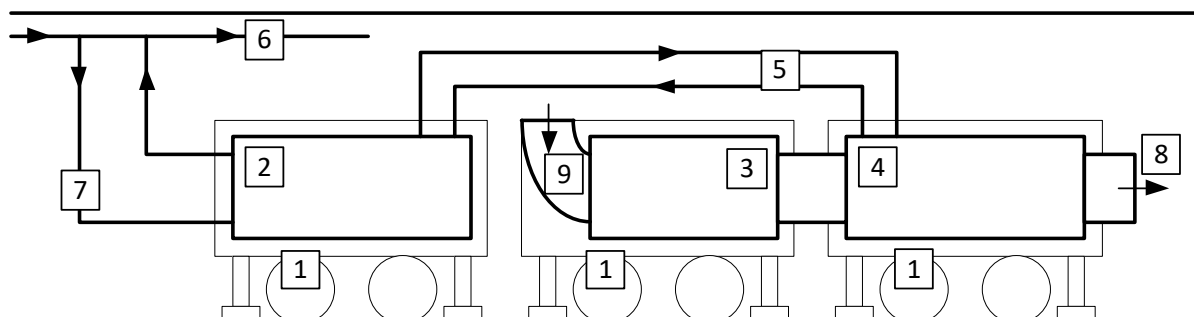


Рисунок 6.6 — Разработанный вариант мобильной системы кондиционирования воздуха

Принцип работы системы кондиционирования воздуха заключается в подаче охлажденного хладоносителя в теплообменный аппарат (воздухоохладитель), где осуществляется его теплообмен с рудничным воздухом. В результате рудничный воздух охлаждается, а хладоноситель нагревается и подается в холодильную машину. В процессе работы холодильная машина передает избыточные тепловыделения хладоносителю, подающемуся из технического трубопровода (позиция 6 на рисунке 6.6). Далее теплота по нему отводится в горные выработки с благоприятным тепловым режимом.

Все элементы предлагаемой системы кондиционирования конструктивно размещаются на колесных тележках так, как это представлено на рисунке 6.6. Это позволяет обеспечить мобильность системы и ее перемещение в пределах горизонтов ведения горных работ на участки с наиболее неблагоприятными микроклиматическими условиями.

Преимуществами предлагаемой системы кондиционирования воздуха являются:

- отсутствие необходимости сооружения стационарной холодильной машины большой мощности;
- использование в качестве внешнего технологического хладоносителя имеющийся в шахте технический трубопровод (например, противопожарный);
- комплекс представляет собой совокупность агрегатов, установленных на колесном шасси, что обеспечивает мобильность. При этом объем монтажных работ минимизирован;
- при перемещении компрессорно-конденсаторного агрегата холодильной машины, соединенного с воздухоохладителем фреоновыми шлангами, нет необходимости расстыковывать агрегаты;
- конструкция агрегатов позволяет применять неполный комплект агрегатов и их различные комбинации.

Вышеперечисленные особенности позволяют обеспечить эффективное охлаждение воздуха на участках ведения очистных работ за счет использования технического трубопровода.

Как уже отмечалось, допустим вариант использования в качестве хладоносителя технической воды из пожарного трубопровода. Пожарный трубопровод используется как для подачи технической воды, так и для отвода теплоты, отбираемой у охлаждаемого воздуха. При этом сброс нагретой воды, исходящей из конденсатора кондиционера, можно осуществлять по двум принципиальным технологическим схемам:

1. Сброс нагретой воды в выработки откаточного горизонта с помощью специального отвода.
2. Сброс нагретой воды в сеть пожарного трубопровода с подачей воды на технологические нужды рудника.

Первый вариант рекомендуется к применению в случае наличия в непосредственной близости от места установки системы кондиционирования выработок, сопряженных с выработками откаточного горизонта, а также благоприятных микроклиматических условий в откаточных выработках и отсутствия сложностей в обеспечении водой потребителей в пределах рабочего горизонта.

Второй вариант является универсальным и рекомендуется к применению в случае, если отсутствует возможность сброса нагретой воды в выработки откаточного горизонта, а также при наличии сложностей в обеспечении потребителей водой в пределах рабочего горизонта. При реализации данной схемы подключение конденсатора кондиционера к шахтному технологическому трубопроводу организуется по байпас-схеме, с обязательным сбросным клапаном на случай внезапного прекращения сброса и потребления воды на ветке после места установки кондиционирования.

На разработанную систему кондиционирования воздуха в проходческих забоях и коротких очистных забоях получен патент на изобретение № 2611770 «Способ кондиционирования воздуха в горных выработках» [123].

6.3. Испытания подземной системы кондиционирования воздуха КШР-350Н на руднике «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»

Рудник «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» на сегодняшний день является самым глубоким действующим рудником нашей страны — горные работы ведутся на глубине до 1800 метров, температура воздуха в горных выработках достигает +45 °С. Для снижения температуры воздуха в условиях рудника на основании выполненных исследований по разработке оптимальных систем подземного кондиционирования воздуха в подготовительных и очистных горных выработках разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию система КШР-350Н.

Система кондиционирования представляет собой автономный шахтный кондиционер с возможностью самостоятельной установки входящих агрегатов (раздельный кондиционер). Конструкция входящих в состав КШР-350Н агрегатов позволяет изменять количество, состав и схему подключения агрегатов в зависимости от требований, предъявляемых к кондиционеру на месте эксплуатации. Конструкция агрегатов КШР

обеспечивает возможность подключения к имеющимся на месте эксплуатации магистральям подвода технологической воды и вентиляционным ставам подачи воздуха, а также применение неполного комплекта агрегатов. Кондиционер КШР-350Н предназначен для регулирования температуры воздуха в подземных горных выработках шахт и рудников, в том числе, опасных по газу и пыли.

В состав системы кондиционирования КШР-350Н входят следующие агрегаты и узлы: холодильная машина, воздухоохладитель, вентиляторная установка, установленные на жесткой сварной раме с дышлом сцепным для транспортировки, а также устройство воздухораспределительное в комплекте с гибкими воздухопроводами и коническим гибким переходником, комплект гибких рукавов для промежуточного хладоносителя.

Холодильная машина и воздухоохладитель установлены на унифицированной раме, оснащенной колесным ходом и регулируемыми опорами. Холодильная машина предназначена для искусственного снижения и поддержания температуры промежуточного хладоносителя в заданном диапазоне (от -5°C до $+40^{\circ}\text{C}$) и подачи охлажденного промежуточного хладоносителя в воздухоохладитель.

Воздухоохладитель предназначен для охлаждения подаваемого воздуха и представляет собой поверхностный воздухоохладитель, установленный на унифицированную раму.

Установка вентиляторная предназначена для подачи охлажденного воздуха в гибкие воздухопроводы, расположенные в охлаждаемом объеме горной выработки.

Устройство воздухораспределительное в комплекте с гибкими воздухопроводами и коническими гибкими переходниками предназначено для соединения вентиляторной установки с воздухоохладителем, распределения и подачи охлажденного в КШР воздуха по системе гибких воздухопроводов в горные выработки.

Взрывонепроницаемые оболочки, в которых размещены электрические части, имеют высокую степень механической прочности по ГОСТ 30852.0-2002, выдерживают давление взрыва внутри них и исключают передачу взрыва в окружающую взрывоопасную среду по ГОСТ 30852.1-2002. На электрооборудовании, которое не имеет блокировки, и наличие напряжения на котором не может быть устранено без открывания, имеются предупредительные надписи: «Открывать, отключив от сети». Искробезопасность электрических цепей достигается за счет применения сертифицированных источников питания, разделения искроопасных и искробезопасных цепей, выполнения электрических схем и монтажа в соответствии с требованиями ГОСТ 30852.10-2002. На

корпусах устройств имеются зажимы для заземления. Взрывозащищенность неэлектрической части кондиционеров КШР-350Н обеспечивается выполнением их конструкции в соответствии с ГОСТ 31441.1-2011 и соблюдением требований ГОСТ 31438.2 при построении всей системы.

Номинальные значения климатических факторов для эксплуатации КШР-350Н в рабочем состоянии следующие:

- плотность воздуха до 1,3 кг/м³;
- температура воздуха при эксплуатации: рабочая +35 °С, предельная +45 °С;
- верхнее значение относительной влажности 100 % при +35 °С;
- температура вмещающих горных пород: средняя +35 °С, предельная +45 °С;
- предельное рабочее нижнее значение давления воздуха 104 кПа (210 мм. рт. ст.) по группе давлений Б для шахт с отметкой до -2,0 тыс. м. над уровнем моря;
- запыленность до 1000 мг/м³;
- содержание в атмосфере коррозионно-активных веществ— сернистый газ до 0,1 мг/м³ в сутки, — хлориды до 10 мг/м² в сутки.

Основные технические данные системы кондиционирования приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 — Основные технические данные разработанной системы КШР-350Н

№	Наименование параметра	Значение
1	Производительность по холоду, кВт, не менее	350
2	Воздухопроизводительность, м ³ /сек, не менее	10
3	Номинальное полное давление воздуха, Па, не менее	3150
4	Эффект охлаждения воздуха, °С	10*
5	Диаметр вентиляционного рукава подачи воздуха, мм	800
6	Количество вентиляторов	1
7	Марка вентиляторов	ВМЭ-8
8	Частота вращения вентилятора, об/мин	3000
9	Установленная мощность электродвигателя вентилятора, кВт, не более	50
10	Холодильный агент	Фреон R407C
11	Заправка фреона, кг, не более	240
12	Смазочное масло	Mobil Arctic, ZERICE S, Emkarate

№	Наименование параметра	Значение
13	Заправка масла, кг, не более	130
14	Диапазон температуры кипения холодильного агента, °С	от минус 7 до плюс 10
15	Предельная температура конденсации, °С	+50
16	Тип компрессора	Винтовой, Aerzener VMY 156 M NR
17	Установленная мощность электродвигателя компрессора, кВт, не более	132
18	Число оборотов электродвигателя компрессора, об/мин, не более	3000
19	Расчетное давление, МПа, не более	18
20	Вид охлаждения маслоохладителя	Впрыск жидкого хладагента
21	Установленная мощность электродвигателя маслонасоса, кВт	4
22	Число оборотов электродвигателя маслонасоса, об/мин	3000
23	Технологический хладоноситель	Вода
24	Расход технологического хладоносителя, м ³ /час, не менее	+22
25	Температура технологического хладоносителя, °С, не более	+15
26	Промежуточный хладоноситель	Антифриз ХНТ-СНВ-25
27	Заправка промежуточного хладоносителя, кг	200
28	Температура промежуточного хладоносителя на выходе из холодильной машины, °С, не более	-3
29	Температура промежуточного хладоносителя на входе в холодильную машину, °С, не более	+40
30	Установленная мощность электродвигателя насоса подачи промежуточного хладоносителя, кВт	15
31	Установленная мощность токоприемников, кВт, не более	350

№	Наименование параметра	Значение
32	Потребляемая мощность, кВт, не более	300
31	Номинальное напряжение питания, В: силовые цепи цепи управления	380/660 ~220, ~24, ~12.
32	Род тока	переменный, 50Гц
33	Допустимое отклонение напряжения питания от номинала, %	10
34	Уровень взрывозащиты электрооборудования	РВ Exd I
35	Степень защиты электрооборудования от внешних воздействий	IP54
37	Климатическое исполнение изделия	УХЛ12/УХЛ15
38	Режим работы	продолжительный
39	Количество агрегатов КШР	3
39	Наибольшие габаритные размеры агрегата КШР, мм, не более: — длина — ширина — высота	6500 1800 2200
40	Масса наибольшего агрегата КШР, кг, не более	8000

Разработанная система кондиционирования имеет следующие особенности, внедренные на основе выполненных исследований и увеличивающие ее эксплуатационные характеристики:

- конструкция входящих в состав КШР агрегатов позволяет изменять количество, состав и схему подключения агрегатов в зависимости от требований, предъявляемых на месте эксплуатации;
- конструкция агрегатов КШР обеспечивает возможность подключения к имеющимся на месте эксплуатации магистралям подвода технологической воды и вентиляционным ставам подачи воздуха;
- конструкция агрегатов КШР совместима с применяемыми на руднике вентиляторами местного проветривания типа ВМ-6, ВМЭ-6, ВМЭ-8.

Система кондиционирования предусматривает автоматизацию следующих технологических процессов:

- автоматическое повторное включение компрессора и вентилятора при кратковременном исчезновении или глубоком падении напряжения питающей сети;
- система предусматривает блокировки, обеспечивающие невозможность повторного или самопроизвольного включения компрессора и привода вентилятора после оперативного или аварийного отключения;
- электрооборудование компрессора соответствует требованиям правил, действующих в РФ, и имеет документацию о соответствии стандартам безопасности, предъявляемых к устройствам данного рода в РФ.

Для проведения опытно-промышленных испытаний был принят участок подсечного горизонта шахты № 3 рудника «Таймырский», ограниченный лентами 21-71 и панелями 22-23, где наблюдалось устойчивое превышение температуры воздуха более +26°C. На рисунке 6.7 представлен участок проведения испытаний в пределах подсечного горизонта со схематичным изображением точек измерений в выработках.

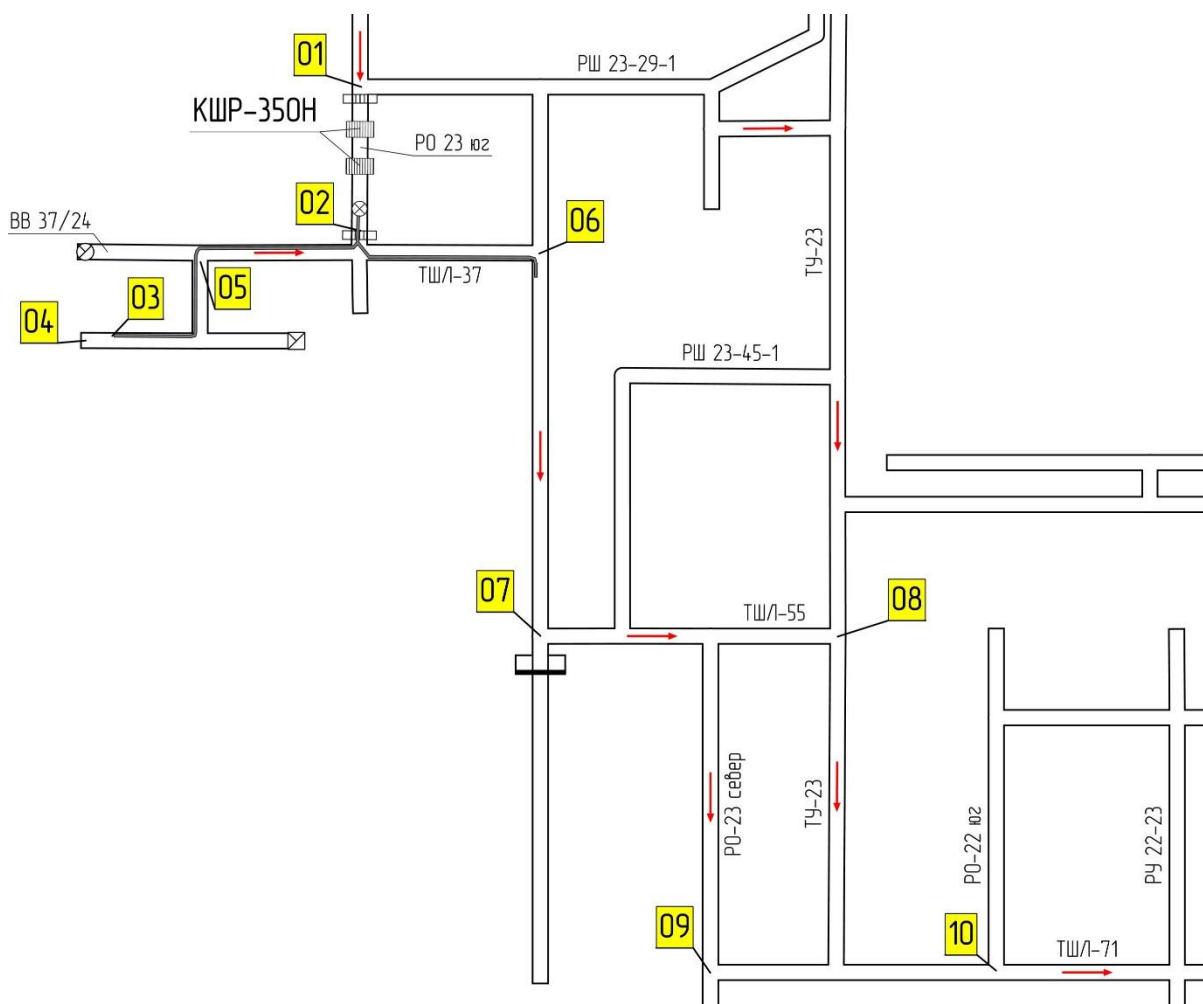


Рисунок 6.7 — Точки измерений микроклиматических параметров воздуха

В качестве действующей тупиковой горной выработки был принят забой технической ниши у рудоспуска 41/24, а в качестве действующей горной выработки сквозного проветривания — участок ТШЛ-55, расположенный в пределах панели № 23.

Система кондиционирования КШР-350Н установлена в специально оборудованной выработке РО-23 юг, на участке между РШ 23-29-1 и ТШЛ-36.

Измерения проведены в различных режимах работы. Номера режимов представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 — Режимы испытаний системы кондиционирования

№	Режим	Описание режима
1	Тепловой режим рабочих зон без кондиционирования воздуха	Измерение микроклиматических параметров в рабочих зонах до применения системы кондиционирования воздуха.
2	Установка оборудования и проведение пуско-наладочных работ	Проверка работоспособности системы в шахтных условиях. Определение фактических показателей работы системы кондиционирования.
3	Локальное охлаждение воздушного потока	Измерение микроклиматических параметров при локальном охлаждении воздуха. При этом охлаждение воздуха происходит локально в месте установки системы кондиционирования. Подача охлажденного потока воздуха до рабочих зон обеспечивается общешахтной струей воздуха без использования воздухопроводов.
4	Подача охлажденного воздуха в рабочую зону тупиковой выработки	Измерение микроклиматических параметров при подаче охлажденного воздуха в рабочую зону тупиковой выработки с помощью отдельного воздуховода.
5	Распределенная подача охлажденного воздуха по рабочим зонам	Распределение холодильной мощности системы кондиционирования по рабочим зонам с помощью воздухопроводов и воздухораспределительного устройства УВР.

В ходе проведения испытаний в каждом измеряемом режиме произведены измерения и расчет следующих параметров:

— фактическая холодопроизводительность кондиционера, кВт;

- температура воздуха в выработке до места установки КШР, °С;
- результирующее снижение температуры воздуха после воздухоохладителя, °С;
- температура воды в противопожарном трубопроводе до КШР, °С;
- температура воды в противопожарном трубопроводе после КШР, °С;
- расход воды в противопожарном трубопроводе, м³/ч;
- расход воздуха, подаваемого в рабочую зону, м³/с;
- температура в начале рабочей зоны, °С;
- температура в конце рабочей зоны, °С.

На рисунке 6.8 представлен фотоснимок воздухоохладителя системы кондиционирования, размещенного в горных выработках подсечного горизонта шахты № 3 рудника «Таймырский».



Рисунок 6.8 — Фотоснимок системы кондиционирования КШР-350Н, установленной в выработке РО-23 юг, на участке между РШ 23-29-1 и ТШЛ-36

Обеспеченные рудником параметры воды, подаваемой из противопожарного трубопровода в качестве технологического хладоносителя для работы системы кондиционирования:

- расход 18 м³/час;
- температура +16 °С.

По результатам испытаний составлена сравнительная таблица результатов нормализации микроклиматических параметров воздуха в различных режимах.

Таблица 6.5 — Измеренные параметры работы системы кондиционирования и температуры воздуха в рабочих зонах

Показатель	Номер режима				
	Режим № 1 — без кондиционирования				
	Режимы № 2-4 — с кондиционированием				
	1	2	3	4	5
Расход воды через КШР, м ³ /ч	18	18	21	18	18
Температура воды до КШР, °С	16	16	16	16	16
Температура воды после КШР, °С	—	39	40	35	37
Холодопроизводительность системы, кВт	—	368	374	305	326
Температура воздуха в рабочей зоне ту-пиковой выработки, °С	26,8	—	—	20,9	22,9
Температура воздуха в рабочей зоне сквозной выработки, °С	27,7	25,8	25,7	26,0	25,4

В ходе проведения ОПИ подтверждены следующие параметры и особенности системы, обеспечивающие эффективную работу в условиях горизонта шахты № 3 рудника «Таймырский»:

- холодопроизводительность системы 374 кВт;
- использование технической воды из противопожарного трубопровода в качестве технологического хладоносителя;
- обеспечение холодопроизводительности системы при расходе хладоносителя 18 м³/час;
- сброс нагретой воды, исходящей из конденсатора кондиционера, в выработки откаточного горизонта (с возможностью сброса в сеть пожарного трубопровода с подачей воды в выработки шахты № 2 и № 3);
- в качестве хладагента в кондиционере используется фреон R407.

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

6.4. Выводы

По результатам выполненных исследований, направленных на разработку оптимальных систем подземного кондиционирования воздуха в подготовительных и очистных выработках, можно сделать следующие выводы:

- места установки и холодильную мощность воздухоохладителей необходимо определять с учетом индивидуальных особенностей сети горных выработок, распределения температур воздуха и окружающего породного массива, расходов воздуха и характера действия источников тепловыделения;
- оптимальной с точки зрения минимизации холодильной мощности является схема параллельной установки воздухоохладителей на каждую рабочую зону при обеспечении минимального расстояния от места охлаждения до границы рабочей зоны;
- требуемая мощность местного воздухоохладителя зависит от температуры окружающего массива горных пород, требуемой температуры охлаждения и тепловой мощности источника тепловыделения;
- для систем разработки с длинными очистными забоями при наличии систем охлаждения комбайнового оборудования оптимальной по критерию минимума суммарных затрат является схема, предусматривающая отдельное отведение теплоты от воздушной струи, подаваемой на проветривание забоя, и системы охлаждения оборудования;
- для систем разработки с короткими очистными забоями при интенсивном характере ведения горных работ оптимальной схемой охлаждения является схема, предусматривающая стационарные места установки воздухоохладителей с возможностью распределенной подачи воздуха по рабочим зонам с помощью воздухопроводов, что подтверждается успешными испытаниями разработанной системы кондиционирования КШР-350Н в горных выработках рудника «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

7. НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ

Современные глубокие шахты и рудники отличаются сложными системами вентиляции, топологией сетей горных выработок, высокими мощностями добычи полезных ископаемых, сложными геологическими и горнотехническими условиями работы. Решение задачи нормализации микроклиматических условий в сети горных выработок глубоких рудников требует разработки комплексных технических систем, отличающихся оптимальными капитальными и эксплуатационными затратами с учетом индивидуальных особенностей шахты или рудника.

Основными критериями разработки систем управления тепловым режимом глубоких рудников являются:

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

Разработанные в главах 3, 4, 5 и 6 ресурсосберегающие решения по созданию технических средств и технологий нормализации микроклиматических условий являются отдельными компонентами, оптимальное сочетание которых при разработке комплексных систем регулирования теплового режима является отдельной задачей, решению которой посвящен раздел 7.2 работы.

Практический опыт и решение задачи оптимизации параметров воздухоохладителей в сети подготовительных и очистных выработок показывает, что качественно характер затрат на реализацию решений по нормализации микроклиматических условий можно представить в виде следующей диаграммы (рисунок 7.1).

От того, какая температура воздуха регламентируется как максимально допустимая, зависит начальный момент ведения горных работ, с которого начинается реализация горнотехнических мероприятий, и, далее, теплотехнических мероприятий. Поэтому обоснование адекватной системы нормирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников, исключающей избыточные запасы параметров, является важной задачей разработки ресурсосберегающих систем. Решению этой первоочередной с точки зрения разработки систем нормализации микроклиматических условий задачи посвящен раздел 7.1.

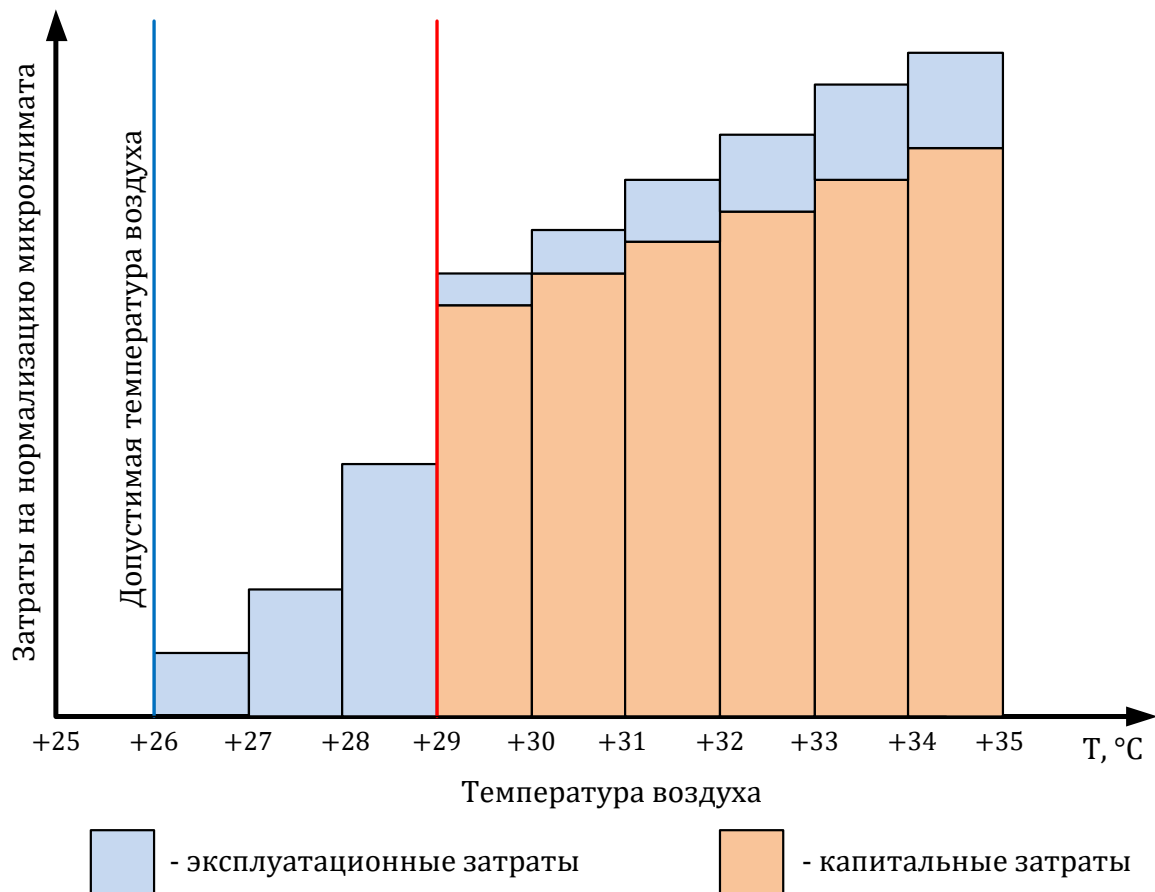


Рисунок 7.1 — Качественная характеристика роста затрат на нормализацию микроклиматических условий

Таким образом, в этой главе работы представлена разработанная методика комплексирования всех результатов выполненных научных исследований и разработок для обоснования параметров и создания систем нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников, удовлетворяющих критерию минимальных капитальных и эксплуатационных затрат на их реализацию и работу.

7.1. Разработка и обоснование системы нормирования микроклиматических условий

Для обоснования системы нормирования микроклиматических условий выбран следующий подход. На основании проведенного в разделе 1.2.2 обзора различных критериев нормирования микроклиматических условий выделяется набор базовых. Далее производится их сравнение по скорости изменения, то есть «жесткости», по отношению к изменению микроклиматических параметров воздуха (температуры сухого термометра, относительной влажности и скорости движения воздуха). На основании проведенного исследования выбирается комплексный критерий, обеспечивающий учет всех па-

раметров микроклимата в наиболее «жестком» варианте для обеспечения технического запаса.

Далее, на основе требований и ограничений действующих нормативных документов предложена организация работ по тепловому фактору при повышенных температурах рудничной атмосферы [61].

7.1.1. Исследование критериев оценки микроклиматических условий

Для анализа выделено семь критериев $K_1 \dots K_7$, отражающих различные подходы к количественной оценке микроклиматических условий рудничной атмосферы.

В качестве первого критерия для анализа принята температура воздуха по сухому термометру, при помощи которой нормируются микроклиматические показатели в действующих «Правилах технической безопасности ...» [126]

$$K_1 = t_d, \quad (7.1)$$

где t_d — температура сухого термометра, °С.

В качестве второго показателя используется температура воздуха, измеренная по влажному термометру, которая также часто используется для оценки параметров микроклимата [194]

$$K_2 = t_w, \quad (7.2)$$

t_w — температура влажного термометра, определяется исходя из Id-диаграммы или с помощью решения следующего уравнения:

$$I_d = I_w, \quad (7.3)$$

$$\begin{aligned} c \cdot t_d + (597 + 0,43t_d) \cdot 0,623 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{\text{пн}}(t_d)}{p_6 - \varphi \cdot p_{\text{пн}}(t_d)} \\ = c \cdot t_w + (597 + 0,43t_w) \cdot 0,623 \\ \cdot \frac{100 \cdot p_{\text{пн}}(t_w)}{p_6 - 100 \cdot p_{\text{пн}}(t_w)}, \end{aligned} \quad (7.4)$$

где c — удельная теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С;

p_6 — барометрическое давление, Па;

φ — относительная влажность, %;

$p_{\text{пн}}(t)$ — давление насыщенного пара, определяется по формуле

$$p_{\text{пн}}(t) = 3.5 + (1 + 0,14 \cdot t)^2. \quad (7.5)$$

Решая данное уравнение, получаем функцию

$$t_w = f(t_d, \varphi). \quad (7.6)$$

Аналитическое выражение этой функции реализовано в CAD Mathematica. В работе оно не приводится в силу его громоздкости.

В качестве третьего исследуемого показателя используется индекс WGBT (wet bulb globe temperature) [194], комплексно учитывающий температуру воздуха по сухому и влажному термометрам согласно следующей зависимости

$$K_3 = 0,7 \cdot t_w + 0,3 \cdot t_d, \quad (7.7)$$

где t_d — температура воздуха по сухому термометру, °С;

t_w — температура воздуха по влажному термометру, °С.

Ощущаемая температура воздуха, комплексно учитывающая влияние температуры, скорости движения и относительной влажности воздуха, определяется по выражению [194]

$$K_4 = t_d + 0,33 \cdot e - 0,7 \cdot V - 4, \quad (7.8)$$

где V — скорость воздуха м/с;

величина e определяется по формуле

$$e = \frac{\varphi}{100} \cdot 6,105 \cdot e^{\left(17,27 \cdot \frac{t_d}{237,7+t_d}\right)}. \quad (7.9)$$

Приведенная формула для ощущаемой температуры воздуха громоздка и не удобна для использования в инженерных расчетах, поэтому была проведена ее линеаризация путем разложения исходного выражения в ряд Тейлора в окрестности температуры +26 °С с удержанием только линейных членов разложения. Полученное выражение было принято в качестве пятого критерия, выражающегося в виде

$$K_5 = t_d + 0,00653 \cdot \varphi \cdot (t_d - 9,06) - 0,7 \cdot V - 4. \quad (7.10)$$

С учетом осуществленной линеаризации выполним сравнительный анализ полученной формулы для K_5 с первоначальным критерием K_4 . Наиболее жесткий случай, соответствующий максимальной погрешности, достигается при относительной влажности воздуха, равной 60 %. График абсолютной погрешности применения линеаризованной формулы от начального выражения приведен на рисунке 7.2.

Как видно из рисунка 7.2, в интервале температур воздуха по сухому термометру от +15 °С до +35 °С абсолютная погрешность линеаризации составляет менее 1 °С, что говорит о возможности использования полученного выражения вместо первоначального.

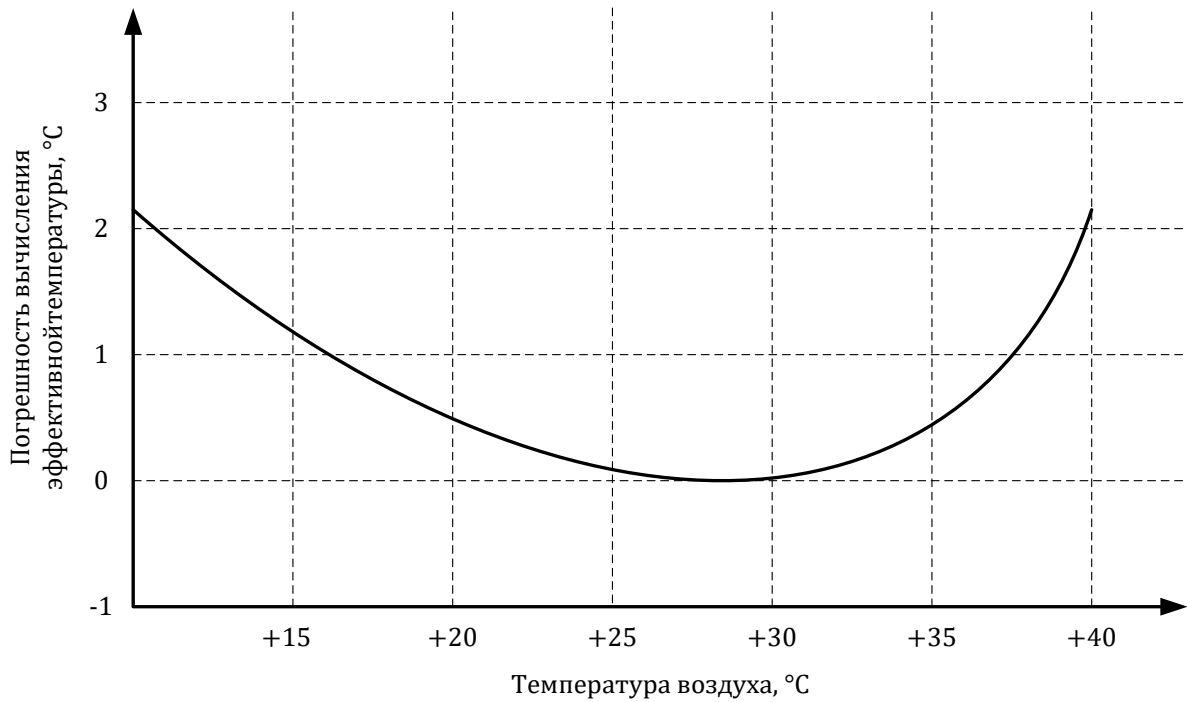


Рисунок 7.2 — Абсолютная погрешность линеаризации функции ощущаемой температуры

В качестве следующего критерия для анализа принята эффективная температура, выражение для которой получено интерполяцией существующей номограммы, приведенной на рисунке 1.2 раздела 1.2 [196]. Таким образом, шестой критерий, являющийся также эффективной температурой, может быть представлен в виде следующего полинома, который получен в результате процесса численной интерполяции приведенной номограммы

$$\begin{aligned}
 K_6 = & -0,1926 - 4,350 \cdot \varphi + 17,39 \cdot \varphi^2 - 13,28 \cdot \varphi^3 + 1,169 \cdot t_d \\
 & - 0,6614 \cdot \varphi \cdot t_d + 0,5587 \cdot \varphi^2 \cdot t_d - 0,007915 \cdot t_d^2 \\
 & + 0,005375 \cdot \varphi \cdot t_d^2 + 0,00003467 \cdot t_d^3 - 6,576 \cdot v \\
 & - 0,4742 \cdot \varphi \cdot v - 0,6926 \cdot \varphi^2 \cdot v + 0,1982 \cdot t_d \cdot v \\
 & + 0,02828 \cdot \varphi \cdot t_d \cdot v - 0,001427 \cdot t_d^2 \cdot v + 1,464 \cdot v^2 \\
 & + 0,05345 \cdot \varphi \cdot v^2 - 0,02275 \cdot t_d \cdot v^3 - 0,1475 \cdot v^3.
 \end{aligned} \tag{7.11}$$

В качестве седьмого анализируемого критерия принимается эффективная температура, рассчитываемая формуле М. McPherson и альтернативным путем учитывающая комплексное влияние температуры, скорости движения и относительной влажности воздуха [216]. Она вычисляется следующим образом

$$\begin{aligned}
X_3 &= 5,27 + 1,3 \cdot v - 1,15 \cdot e^{-2 \cdot v}, \\
X_2 &= \frac{17(X_3 \cdot (t_d - t_w) + 8,33 \cdot (t_w - 20))}{(X_3 - 1,35) \cdot (t_d - t_w) + 141,61}, \\
X_1 &= \frac{8,33 \cdot (17 \cdot X_3 - (X_3 - 1,35) \cdot (t_w - 20))}{(X_3 - 1,35) \cdot (t_d - t_w) + 141,61}, \\
K_7 &= 20 + \frac{4 \cdot (4,12 - X_1) + X_2}{1,65176}.
\end{aligned} \tag{7.12}$$

Проведено численное сравнение приведенных критериев в зависимости от трех основных микроклиматических параметров — температуры воздуха по сухому термометру, скорости движения воздуха и его относительной влажности.

Расчеты выполнялись для двух наборов микроклиматических параметров рудничного воздуха. Первый соответствует предельным условиям по существующим «Правилам технической безопасности ...» (температура воздуха принимается равной +26 °С), а второй соответствует наблюдаемым тепловым условиям в лаве при ведении добычных работ (температура воздуха принимается равной +32 °С).

На рисунке 7.3 приведены зависимости анализируемых критериев от скорости движения воздуха.

Полученные результаты говорят о том, что учет скорости движения воздуха обеспечивают критерии $K_4 \dots K_7$, при этом самый «жесткий» учет обеспечивается использованием критерия ощущаемой температуры воздуха. Эффективные температуры воздуха отличаются нелинейной зависимостью, и согласно приведенным формулам (7.10)-(7.12) в интервале скоростей от 0 м/с до 1,5 м/с увеличение скорости движения воздуха приводит к существенному охлаждаемому эффекту.

На рисунке 7.4 приведены зависимости анализируемых критериев от относительной влажности воздуха.

Полученные результаты показывают, что учет скорости движения воздуха обеспечивают критерии $K_4 \dots K_7$, при этом наиболее «жесткий» учет обеспечивается использованием критериев температуры влажного воздуха, WBGT-индекса и ощущаемой температуры воздуха.

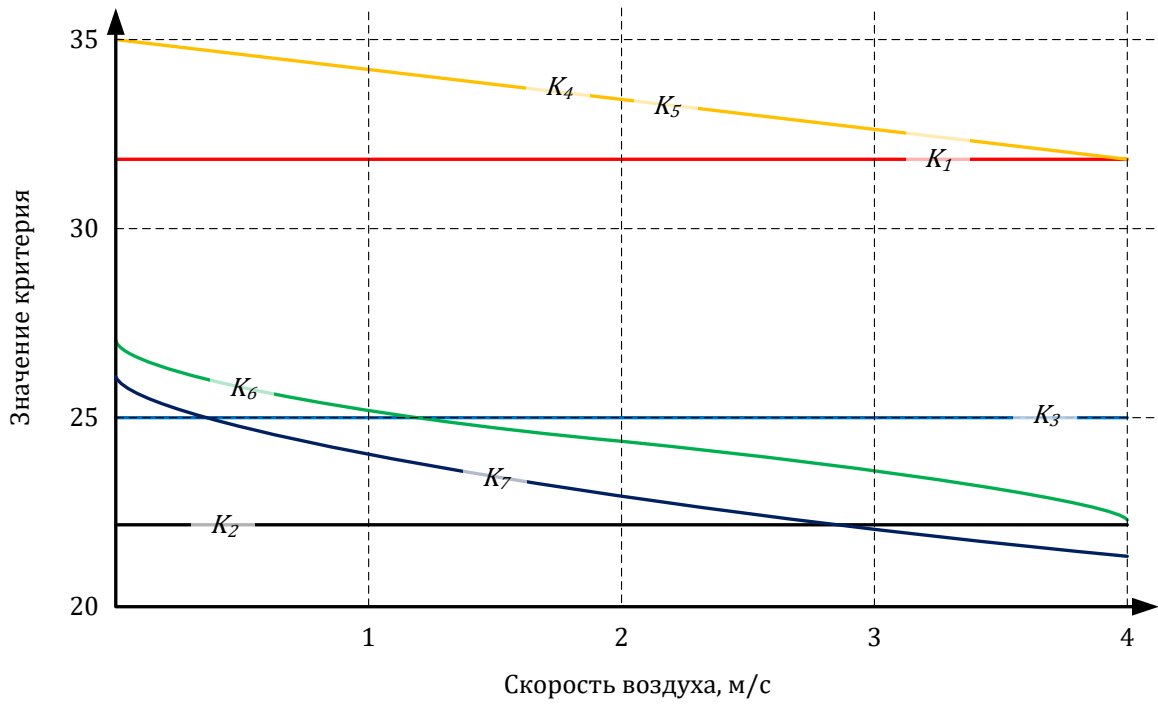


Рисунок 7.3 — Зависимости изменения критериев от скорости при относительной влажности воздуха 45% и температуре +32 °С

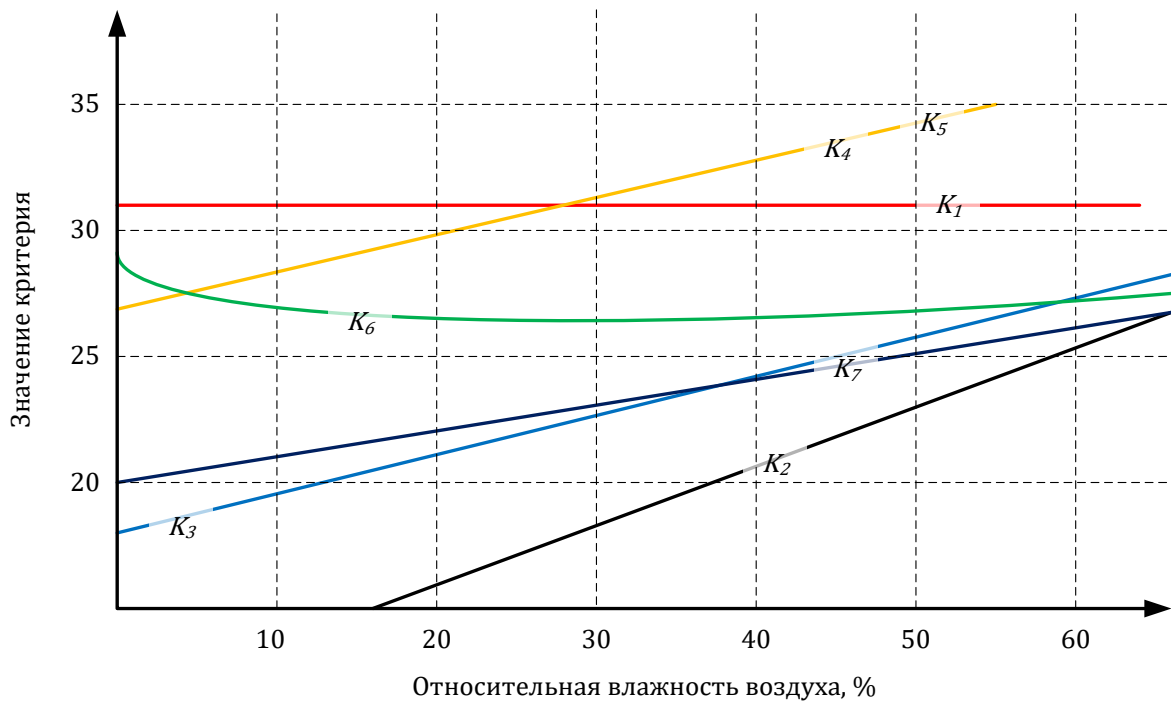


Рисунок 7.4 — Зависимости изменения критериев от относительной влажности при скорости движения воздуха 1 м/с и температуре 26 °С

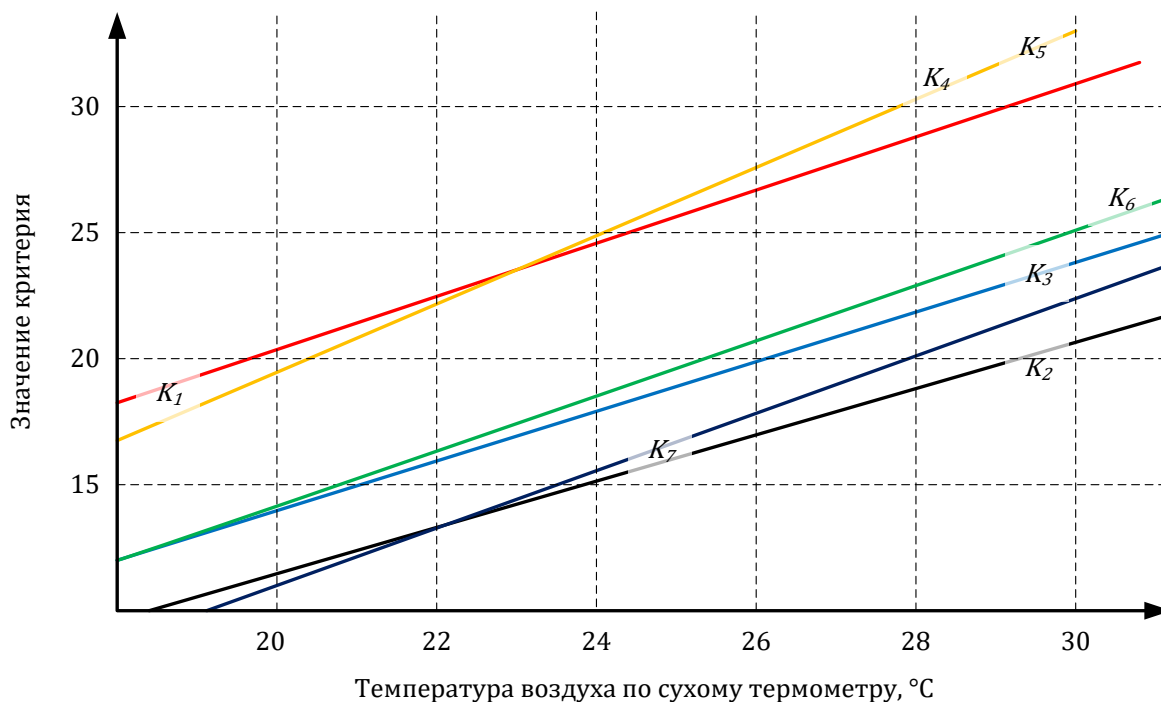


Рисунок 7.5 — Зависимости изменения критериев от температуры воздуха по сухому термометру при скорости движения воздуха 1 м/с и относительной влажности 45 %

Таким образом, наиболее адекватным и жестким критерием, учитывающим влияние скорости движения и относительной влажности воздуха, является ощущаемая температура воздуха вида

$$T_{ef} = t_d + 0,00653 \cdot \varphi \cdot (t_d - 9,06) - 0,7 \cdot v - 4. \quad (7.13)$$

При этом линейризация исходной формулы обеспечивает достаточную точность расчетов в интересующем интервале микроклиматических параметров воздуха и позволяет использовать полученное выражение в инженерных расчетах.

Полученный критерий позволяет перейти к разработке систем нормирования и организации труда по тепловому фактору.

7.1.2. Обоснование системы нормирования микроклиматических условий и организации труда по тепловому фактору

Система нормирования микроклиматических условий в горных выработках должна отвечать следующим требованиям:

- соответствовать требованиям действующих нормативных документов, регламентирующих безопасность ведения горных работ и условий труда в подземных рабочих зонах;

- учитывать комплексное влияние температуры воздуха по сухому термометру, скорости движения воздуха и относительной влажности воздуха на микроклиматические условия рудничной атмосферы;
- учитывать время и интенсивность выполнения работ.

На сегодняшний день основным документом, регламентирующим безопасность ведения горных работ и условий труда в подземных рабочих зонах, являются Федеральные нормы и правила «Правила безопасности при ведении горных работ ...», пункт 156 которых гласит, что «Температура воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок и на рабочих местах с постоянным присутствием персонала не должна превышать +26 °С. При температуре воздуха свыше +26 °С должно предусматриваться его охлаждение или разрабатываться мероприятия, предусматривающие режим работы персонала с перерывами на отдых в специально оборудованных местах с температурой воздуха не выше +26 °С». Таким образом, действующие требования накладывают ограничения на максимальную температуру воздуха именно по сухому термометру, и не позволяют напрямую использовать критерий вида (7.13). В то же время, этот критерий может быть использован для обоснования допустимой температуры воздуха в горных выработках, превышающей +26 °С (с учетом повышенной скорости движения воздуха и сниженной влажности), при проектировании и обосновании мероприятий регулирования теплового режима в рамках разработки «Обоснования безопасности опасного производственного объекта» согласно ФЗ № 116 [157].

Калиброванная линеаризованная ощущаемая температура определяется следующей формулой

$$T_{ef} = t_d + 0,00653 \cdot \varphi \cdot (t_d - 9,06) - 0,7 \cdot v - 4. \quad (7.14)$$

Поскольку постоянные рабочие места, привязанные к одной точке в горной выработке, отсутствуют, и горнорабочие в процессе работ перемещаются вдоль выработки или даже нескольких выработок, к нормированию следует принимать усредненную по траектории их перемещения в рабочей зоне температуру воздуха. Средняя по длине температура воздуха определяется по формуле

$$\bar{T} = \frac{1}{L} \cdot \sum_i T_i \cdot L_i, \quad (7.15)$$

где L — протяженность рабочей зоны, м;

T_i — температура воздуха по сухому термометру или ощущаемая температура воздуха на i -ом участке рабочей зоны, °С;

L_i — длина i -ого участка рабочей зоны, м.

Формулировка пункта 156 Федеральных норм и правил «Правила безопасности при ведении горных работ ...» позволяет реализовывать так называемую защиту горно-рабочих временем — ограничивать время их пребывания при температуре воздуха, превышающей допустимую. Для определенности предельную температуру воздуха и допустимое время работы персонала следует устанавливать согласно документу «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [135]. Требования данного документа установлены согласно медицинским исследованиям влияния теплового фактора на здоровье рабочих. В этом документе представлена гибкая система нормирования микроклиматических параметров воздуха и допустимого времени работы при высоких температурах окружающей среды с учетом тяжести выполняемых работ.

Поэтому рассчитанную по формуле (7.15) осредненную температуру воздуха в рабочей зоне следует сравнивать с допустимой температурой, определяемой в зависимости от продолжительности смены и категории работ по энергозатратам (таблица 7.1).

Таблица 7.1 — Время пребывания на рабочих местах при температуре воздуха выше допустимых величин

Температура воздуха на рабочем месте, °С	Время пребывания, часов		
	Категория Ia-IIб	Категория IIa-IIб	Категория III
32,5	1	—	—
32	2	—	—
31,5	2,5	1	—
31	3	2	—
30,5	4	2,5	1
30	5	3	2
29,5	5,5	4	2,5
29	6	5	3
28,5	7	5,5	4
28	8	6	5
27,5	—	7	5,5
27	—	8	6
26,5	—	—	7
26	—	—	8

Таким образом, предельное значение средневзвешенной температуры воздуха должно быть не больше +27...+29 °С в зависимости от категории работ.

При разработке ресурсосберегающих систем нормализации микроклиматических условий для глубоких шахт и рудников рекомендуется разрабатывать «Обоснование безопасности опасного производственного объекта» для применения следующих рациональных принципов нормирования микроклиматических условий:

- показателем количественной оценки микроклиматических условий следует принять линеаризованную функцию ощущаемой температуры воздуха, как учитывающую влияние скорости движения и относительной влажности воздуха с обеспечением максимального запаса по фактору безопасности;
- предельные значения микроклиматических параметров и допустимое время работы персонала при температуре воздуха выше допустимых величин должны определяться согласно действующим Санитарным нормам и правилам;
- должна учитываться неравномерность распределения микроклиматических параметров в горных выработках.

Разработанная система нормирования микроклиматических условий в горных выработках и организационные мероприятия по обеспечению безопасных условий труда по тепловому фактору вошли в состав методик по расчету количества воздуха и организации проветривания горнодобывающих предприятий ОАО «Беларуськалий» и ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

7.2. Методические основы построения комплексных ресурсосберегающих систем нормализации микроклиматических условий

Решение задачи нормализации микроклиматических условий в сети горных выработок глубоких шахт требует разработки организационно-технических мероприятий и комплексных инженерных решений, отличающихся эффективностью и минимальными капитальными затратами на реализацию. Задача выбора, комплексирования и определения параметров применения отдельных способов регулирования теплового режима может быть решена на основе метода вариантов, с использованием численного моделирования сопряженных процессов тепло- и воздухораспределения в сети горных выработок с учетом термодинамических факторов, влияющих на микроклиматические условия рудничной атмосферы.

В целом логику определения технических решений при разработке ресурсосберегающих систем нормализации микроклиматических условий можно описать следующей последовательностью этапов:

1. Разработка тепловой модели рудника на основе экспериментальных и проектных данных.
2. Выделение рабочих зон с временным и постоянным пребыванием горнорабочих, обоснование допустимых микроклиматических параметров воздуха в них.
3. Расчет микроклиматических параметров в рабочих зонах.
4. Определение эффективного комплекса горнотехнических и теплотехнических мероприятий по регулированию теплового режима по критерию обеспечения допустимых микроклиматических параметров воздуха в рабочих зонах.
5. Уточнение параметров разрабатываемых технических решений на основе многовариантного численного моделирования на тепловой модели.
6. Разработка технологических схем кондиционирования и отведения избыточных тепловыделений, расчет технико-экономических параметров их внедрения.
7. Выбор оптимального варианта по критерию минимальных суммарных затрат на реализацию и эксплуатацию системы.

Далее каждый из этапов раскрыт более подробно.

7.2.1. Разработка тепловой модели рудника

Тепловая модель шахты — это упрощенное представление сети горных выработок, основа моделирования тепловых и аэродинамических процессов в рудничной атмосфере и породном массиве с целью определения микроклиматических параметров воздуха. Математически тепловая модель шахты представляет собой сеть, топология которой строится в виде ориентированного графа, в котором каждой горной выработке (или участку горных выработок) ставится в соответствии ребро (ветвь) графа, а сопряжению горных выработок — узел графа. Таким образом, математически определяется множество узлов N и ветвей M сети, их соединяющих.

Построение модели состоит из следующих этапов:

1. Строится топология вентиляционной сети в соответствии с погоризонтными планами и аксонометрическими схемами горных выработок шахты. У каждого узла сети задается значение глубины в соответствии с высотной отметкой моделируемого им сопряжения горных выработок.

2. Определяются и задаются геометрические параметры элементов модели — каждой ветви присваивается длина и площадь сечения выработки, ей моделируемой.
3. Определяется и задается аэродинамическое сопротивление ветвей сети на основании данных о типе выработки и известном коэффициенте аэродинамического сопротивления.
4. Определяются и задаются теплофизические параметры элементов модели.

В работе предлагается использование разработанных в главе 2 математических моделей для создания тепловых моделей глубоких рудников. Следовательно, для разработки тепловых моделей требуется определить и добавить все термодинамические факторы, которые учитываются в разработанных математических моделях, а именно:

- задать зависимость изменения температуры и влажности подаваемого в шахту или рудник воздуха;
- учесть теплофизические свойства ветвей модели;
- учесть техногенные источники тепловыделения — приводы горных машин, закладку выработанного пространства и т.д.

Величину среднегодовой температуры, а также амплитуду сезонных и суточных колебаний температуры и влажности наружного воздуха определяют климатические особенности местности, они принимаются на основании СП 131.13330.2012 [147].

Функционально зависимость температуры поступающего воздуха от времени описывается периодической зависимостью

$$T_a = T_a^{\text{cp}} + \Delta T \cdot \cos\left(\frac{t}{31536000}\right), \quad (6.4)$$

где T_a^{cp} — среднегодовая температура воздуха региона, °C;
 ΔT — сезонная амплитуда колебаний воздуха, °C.

В холодный период пониженная температура наружного воздуха принимается равной или больше +2 °C, так как воздухоподающие стволы оборудованы калориферными установками для подогрева подаваемого в шахту воздуха. В связи с чем, а также с учетом работы калориферов, амплитуда колебаний искусственно уменьшается.

Если воздухоподающие стволы оборудованы поверхностной системой кондиционирования воздуха, то температура воздуха, подаваемого в ствол, определяется параметрами этой системы. Например, в случае применения мощной системы кондиционирования возможно задание в модели круглогодичной подачи воздуха с температурой +2 °C.

Для всех ветвей тепловой модели определяются также следующие теплофизические параметры: коэффициент теплоотдачи на границе, термическое сопротивление

крепи, теплопроводность, плотность и теплоемкость горных пород, окружающих горную выработку.

Кроме этого, в выработках с техногенными источниками тепловыделений задаются параметры источников: тепловая мощность, протяженность и временная зависимость тепловыделения.

На конечном этапе построения тепловой модели определяются параметры численного моделирования процессов теплораспределения в сети горных выработок. Для получения корректных результатов моделирования распределения температуры воздуха определяются и задаются следующие параметры численного расчета: расчетный шаг по времени, начальный шаг по радиальной координате массива, радиус «теплого влияния» для массива.

Временной шаг численного расчета определяется в соответствии с требованиями модели идеального вытеснения по формуле:

$$\Delta t = \text{Min} \left[\frac{L_i}{v_i} \right], i \in M, \quad (7.16)$$

где L_i — длина i -ой горной выработки, м;

v_i — скорость воздуха в i -ой горной выработке, м/с.

7.2.2. Расчет микроклиматических параметров в рабочих зонах

Для начала следует ввести понятие рабочей зоны. В общем случае определение рабочей зоны может быть дано в нормативной документации, разработанной для условий шахты, рудника или месторождения. Часто определение границ рабочих зон фигурирует в Специальных мероприятиях по ведению горных работ в условиях газового режима, Регламентах технологических процессов, Методиках и регламентах по организации проветривания.

В общем случае, опираясь на требования Федеральных норм и правил «Правила безопасности при ведении горных работ ...», рабочая зона — это участок горной выработки, включающий места постоянного пребывания горнорабочих. Границы рабочей зоны определяются следующим образом:

- для тупиковой горной выработки это призабойный участок, ограниченный с одной стороны забоем выработки, а с другой концом воздуховода от вентилятора местного проветривания;
- для выработки сквозного проветривания (очистные и транспортные выработки) это участок, ограниченный границами панели (шагом подготовки).

На рисунке 7.6 приведено схематичное изображение рабочих зон.

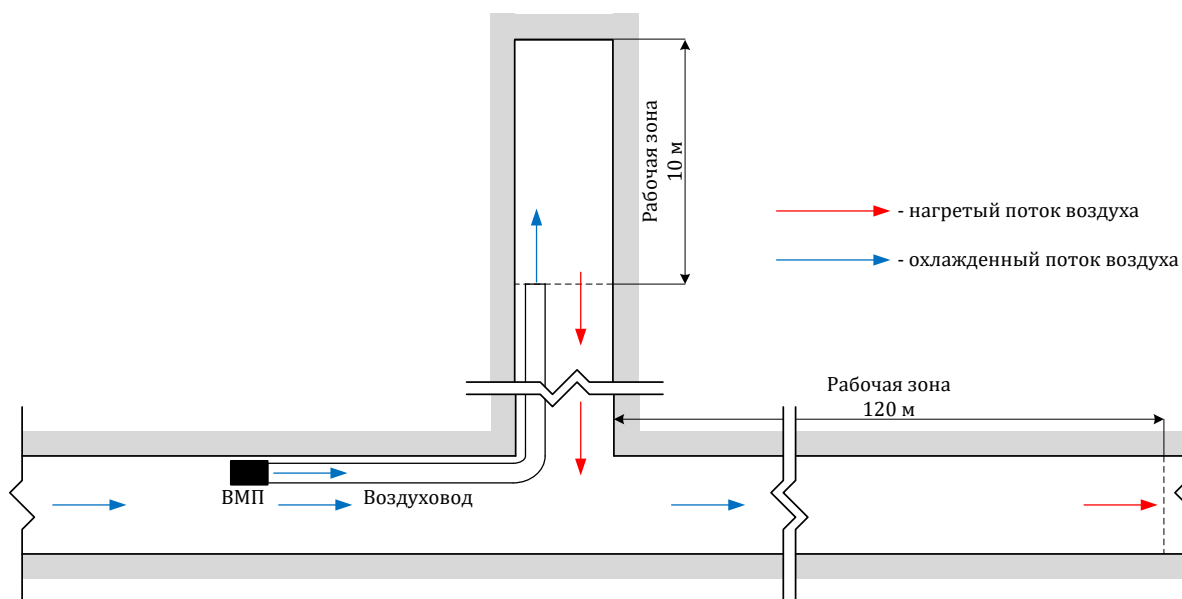


Рисунок 7.6 — Схематичное изображение рабочих зон тупиковой и сквозной горной выработок

Определение микроклиматических параметров производится двумя принципиально различными способами в зависимости от того, действующие или перспективные горные выработки рассматриваются:

1. Для действующих горных выработок и рудников в рамках контроля состояния атмосферы горных выработок специалистами подземного участка вентиляции или выполнения воздушно-депресссионных съемок проводятся экспериментальные измерения микроклиматических параметров рудничной атмосферы.
2. Для проектируемых рудников и участков горных выработок выполняется расчетный прогноз микроклиматических параметров рудничной атмосферы на тепловой модели рудника (участка). В качестве исходных данных для расчета используются принятые горнотехнические решения, материалы исследований источников тепловыделений, а также параметры атмосферного воздуха.

Для определения рабочих зон, где требуется кондиционирование рудничного воздуха, в первую очередь необходимо зафиксировать превышение нормативных значений микроклиматических параметров в соответствии с действующей нормативной документацией. При нормировании микроклиматических условий следует руководствоваться разработанной системой, представленной в разделе 7.1.2.

К рабочим зонам, в которых требуется кондиционирование воздуха, относятся:

- рабочие зоны с температурой воздуха, превышающей $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$, согласно пункту 156 ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ...» [126].
- рабочие зоны с температурой воздуха, превышающей $+30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, согласно СанПиН [135]. При этом с целью защиты работающих от возможного перегревания СанПиН регламентируется время пребывания на рабочем месте. Для III категории работ при температуре воздуха $+30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ время пребывания составляет 1 час.

Спрогнозированные параметры рудничной атмосферы для отдельных рабочих зон сравниваются с нормативными, после чего принимается решение о целесообразности применения системы кондиционирования.

7.2.3. Определение оптимального сочетания способов регулирования теплового режима

Технологическими компонентами комплексной системы нормализации микроклиматических условий являются способы, разработанные в разделах 3,4,5 и 6. Успешное решение задачи построения системы кондиционирования в соответствии с представленными критериями возможно с использованием численного моделирования воздухо- и теплораспределения в рудничной вентиляционной сети при применении различных средств регулирования теплового режима в соответствии со следующим алгоритмом.

На основании выполненных исследований формирования микроклиматических условий в горных выработках различных типов и развития способов нормализации микроклиматических условий можно определить границы эффективности каждого из способов. Эти границы эффективности преимущественно зависят от факторов формирования микроклиматических условий и схематично представлены на рисунке 7.7.

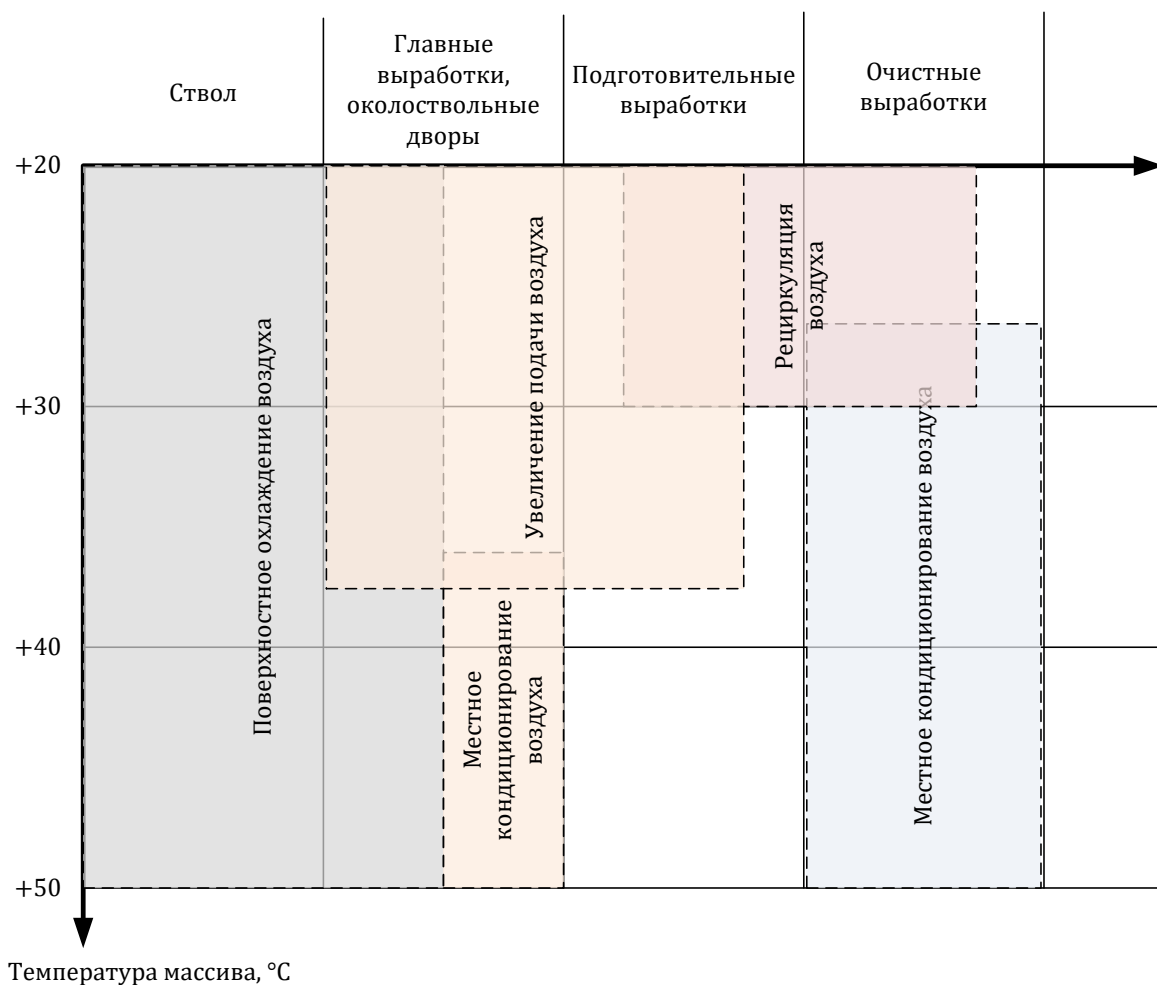


Рисунок 7.7 — Диаграмма к выбору оптимального сочетания мероприятий регулирования теплового режима

На основании моделирования на тепловой модели рудника производится уточнение областей эффективности различных мероприятий по представленной диаграмме в координатных осях «температура массива горных пород — удаленность рабочих зон по тракту движения воздуха» с учетом действия техногенных источников тепловыделения в пределах рабочих зон. На основании выполненного уточнения определяются группы эффективных способов для различных рабочих зон. Далее мероприятия регулирования теплового режима традиционно разделяются на горнотехнические и теплотехнические.

На следующем этапе производится оптимизация параметров горнотехнических мероприятий на основе численного моделирования на тепловой модели рудника и расчета суммарных энергетических и тепловых потерь по каждому варианту. Для оценки горнотехнических мероприятий регулирования теплового режима с точки зрения эксплуатационных затрат производится суммарный расчет энергетических затрат за счет

холодopotерь воздушной струи (ее нагревания за счет теплопритоков) и аэродинамической мощности на поддержание заданного расхода по следующей формуле

$$E = \sum_{i=1}^N (R_i \cdot Q_i^3 + Q_i \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot \Delta T_i), \quad (7.17)$$

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

R_i — аэродинамическое сопротивление выработки (кмюрт);

Q_i — расход воздуха в выработке ($\text{м}^3/\text{с}$);

c_a — удельная массовая теплоемкость воздуха ($\text{Дж}/^\circ\text{C} \cdot \text{кг}$);

ρ_a — плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$);

ΔT_i — разница температур между начальной температурой воздуха, поступающего на проветривание горизонта, и конечной — поступающего на проветривание подземных рабочих зон.

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

Применение местного кондиционирования воздуха первоочередно предусматривает расчет требуемой холодопроизводительности установки с учетом температурных условий. На основе определенных параметров воздушного потока производится расчет требуемой холодильной мощности для каждой рабочей зоны по формуле

$$W = Q \cdot \rho \cdot (I_k - I_n),$$

где Q — расход воздуха для проветривания рабочей зоны, $\text{м}^3/\text{с}$.

ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;

I_k — теплосодержание воздуха на выходе из рабочей зоны, $\text{кДж}/\text{кг}$;

I_n — теплосодержание воздуха на входе в рабочей зоны, $\text{кДж}/\text{кг}$.

Теплосодержание воздуха определяется с помощью I_d -диаграммы влажного воздуха по вычисленным значениям температуры и относительной влажности воздуха

$$I = f(T, \varphi).$$

Температура (T) и относительная влажность воздуха (φ) определяются на основе моделирования на тепловой модели рудника. В отдельных случаях, когда решается задача определения параметров локальной системы охлаждения для уже существующего участка горных выработок, в качестве исходных данных могут быть использованы фак-

тические измерения, полученные в ходе проведения температурно-влажностной и воздушно-депресссионной съемок на руднике.

По результатам расчета холодильных мощностей рассчитывается требуемая холодильная мощность системы кондиционирования по формуле

$$W = K_w \cdot \sum_{i=1}^N W_i,$$

где K — коэффициент запаса, учитывающий холодопотери струи при движении воздуха от воздухоохладителя до рабочей зоны, принимается равным:

- 1,1 — при использовании воздуховодов для подачи охлажденного воздуха до рабочих зон;
- 1,3 — при местном кондиционировании воздуха с локальным охлаждением без использования воздуховодов.

Также коэффициент K может быть рассчитан на основе фактических измерений.

Рекомендуемое количество рабочих зон, охлаждаемых одной установкой кондиционирования — не более 3-х. При большем количестве рабочих зон могут возникнуть сложности перераспределения охлажденного воздуха между отдельными потребителями. Для избегания этих сложностей рекомендуется увеличить число установок кондиционирования.

Далее требуется моделирование использования теплотехнических вариантов, расчет эффективности и эксплуатационных затрат при их применении. Дополнительно при оценке теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима с точки зрения эксплуатационных затрат производится суммарный расчет энергетических затрат на работу и обслуживание технических средств систем кондиционирования воздуха.

$$\sum_{i=1}^N (K_{Ni} \cdot W_i^R + N_i^F + N_i^P) \rightarrow \min, \quad (7.18)$$

где N — общее число холодильных машин в разрабатываемой системе кондиционирования;

W_i^R — холодильная мощность i -ой холодильной машины, кВт;

K_{Ni} — безразмерный коэффициент холодильной мощности, равный отношению электрической мощности холодильной машины к холодильной, зависит от типа оборудования и условий его работы и варьируется в интервале от 0,4 до 1;

N_i^F — суммарная мощность вентиляторов, обеспечивающих проток воздуха через систему теплообменных аппаратов i -ой холодильной машины, кВт;

N_i^P — суммарная мощность насосов, обеспечивающих проток масла, тепло- и хладоносителей в i -ой холодильной машине, кВт.

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

$$+2\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T(T, v, \varphi) \leq T^{max}(T, v, \varphi),$$
$$v_{min} \leq v \leq v_{max}.$$

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

7.2.4. Выбор способа отведения избыточных тепловыделений

Завершающий этап разработки комплексной системы нормализации микроклиматических условий заключается в выборе технологической схемы кондиционирования и способа отведения избыточных тепловыделений. Для решения этой задачи разработана общая классификация систем кондиционирования воздуха с различными вариантами отведения избыточных тепловыделений, которая представлена на рисунке 7.8.

Наиболее энергоэффективным решением по холодоснабжению разветвленной сети горных выработок при высокой суммарной требуемой холодопроизводительности является применение центральной холодильной станции [215,164,53]. В общем случае применение центральных холодильных машин высокой мощности обеспечивает более высокий коэффициент энергоэффективности, чем применение группы локальных установок меньшей мощности [217]. Центральная холодильная машина может размещаться в горных выработках и на дневной поверхности. В зависимости от места размещения холодильной машины, требуются различные элементы системы кондиционирования воздуха.

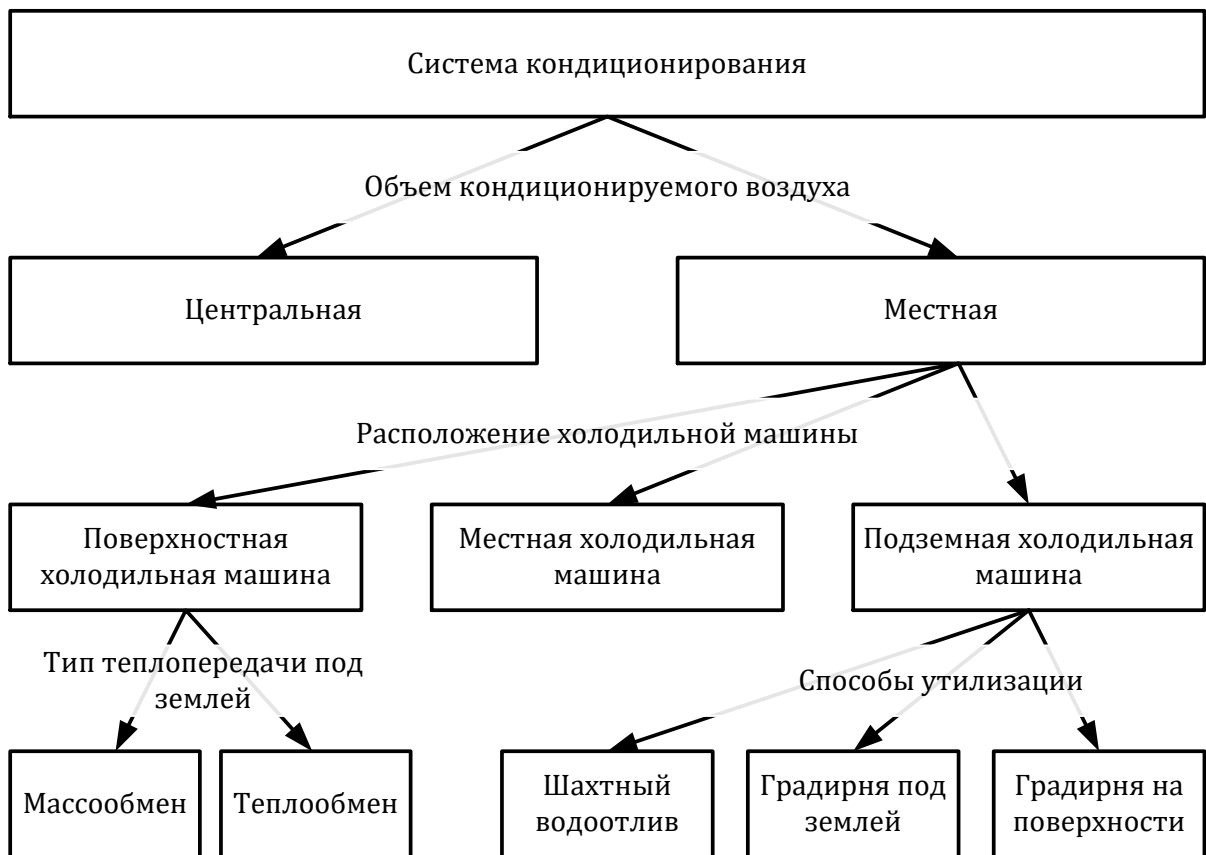


Рисунок 7.8 — Классификация систем кондиционирования воздуха

При поверхностном размещении потребуется обеспечить циркуляцию хладоносителя от холодильной машины до глубоких горизонтов, для чего необходимо применение теплообменных систем, работающих под высоким гидростатическим давлением (давлением водяного столба) и расположенных в горных выработках глубокого горизонта (в технологической камере околоствольного двора). Система холодоснабжения при этом разделяется на два контура: трубопроводы низкого давления в выработках горизонта (для обеспечения безопасности и возможности оперативного ремонта силами рудника) и трубопроводы высокого давления (более 100 Бар) в стволе и в специальной камере, расположенной в околоствольном дворе. На сегодняшний день наиболее широкое применение нашли системы рекуперативного теплообмена высокого давления и система обмена давлениями (P.E.S.). Эти элементы системы кондиционирования предназначены для передачи теплоты от контура низкого давления (на горизонте) к контуру высокого давления (в стволе).

Подземное размещение центральной холодильной машины предполагает две основных схемы работы: с отведением тепловыделений в подземных горных выработках, где в качестве промежуточного теплоносителя могут выступать рудничный воздух или

шахтная вода, и с отведением тепловыделений непосредственно на дневной поверхности.

При разработке вариантов размещения холодильной машины в горных выработках глубокого горизонта необходимо решить следующие основные вопросы: определить располагаемый теплоутилизационный потенциал сопутствующих технологических процессов: вентиляции, шахтного водоотлива; рассмотреть возможность прокладки трубопроводов (подающего и обратного) с теплоизоляцией по стволу (воздухоподающему или вентиляционному) для обособленного отведения теплоизбытков от работы подземной холодильной машины посредством градирни, расположенной на дневной поверхности.

Вариант отведения тепловыделений в исходящую вентиляционную струю шахты или рудника целесообразен при наличии постоянного расхода воздуха в месте установки градирни с параметрами, при которых выполняется неравенство

$$c_a \cdot \rho_a \cdot Q_a \cdot (T_{ref} - T_a) + L_w \cdot Q_w \geq W, \quad (7.19)$$

где c_a — теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С;

ρ_a — плотность воздуха, кг/м³;

Q_a — расход воздуха через градирню, м³/с;

T_a — начальная температура воздуха на входе в теплообменник, °С;

Q_w — обеспечиваемый расход воды в месте установки градирни, м³/с;

Q_w — скрытая теплота парообразования, кДж/кг;

T_{ref} — максимальная температура конденсации фреона, чаще всего принимается равной 65 °С.

Таким образом, при отведении тепловой энергии от работы холодильного оборудования целесообразно размещать градирни вблизи вентиляционных стволов на участках с наибольшим расходом воздуха. Для организации представленной схемы требуются определенные основные инженерные сооружения в горных выработках (на дневной поверхности — не требуются). В горных выработках: холодильная машина, градирни в выработках в районе сопряжения с вентиляционными стволами, трубопроводы (подающий и обратный) с теплоизоляцией для транспортировки теплоносителя от конденсатора холодильной машины до градирен, трубопроводы (подающий и обратный) с теплоизоляцией для транспортировки хладоносителя в рабочие зоны с местным охлаждением воздуха, воздухоохладители в рабочих зонах.

Вариант отведения тепловыделений в главный водоотлив шахты или рудника целесообразен при наличии постоянного водопритока с параметрами, при которых выполняется неравенство

$$c_w \cdot \rho_w \cdot Q_w \cdot (T_{ref} - T_w) \geq W, \quad (7.20)$$

где c_w — теплоемкость воды, кДж/кг·°С;

ρ_w — плотность воды, кг/м³;

Q_w — производительность системы водоотлива, м³/с;

T_w — начальная температура воды на входе в теплообменник, °С.

В таком варианте при отведении тепловой энергии от работы холодильного оборудования целесообразно размещать холодильную машину по возможности вблизи системы главного водоотлива. Для организации представленной схемы требуются дополнительные основные инженерные сооружения в горных выработках (на дневной поверхности — не требуются). В горных выработках: холодильная машина, теплообменник охлаждения конденсатора в водосборнике, трубопроводы (подающий и обратный) с теплоизоляцией для транспортировки теплоносителя от конденсатора холодильной машины до теплообменника в водосборнике, трубопроводы (подающий и обратный) с теплоизоляцией для транспортировки хладоносителя в рабочие зоны с местным охлаждением воздуха, воздухоохладители в рабочих зонах.

Вариант отведения тепловыделений от работы подземной холодильной машины посредством градирни, размещенной на дневной поверхности на промплощадке, позволяет производить отвод теплоизбытков обособленно, без привязки к параметрам технологических процессов (режим вентиляции, работа главного водоотлива), но требует прокладки трубопроводов (подающего и обратного) с теплоизоляцией по стволам. При работе оборудования по такой схеме отведения тепловой энергии от работы холодильного оборудования целесообразно размещать холодильную машину в выработках околоствольного двора вблизи стволов. Для организации представленной схемы требуются вспомогательные инженерные сооружения. На дневной поверхности — градирня. В горных выработках: холодильная машина, трубопроводы (подающий и обратный) с теплоизоляцией для транспортировки теплоносителя от конденсатора холодильной машины до градирни на дневной поверхности, трубопроводы (подающий и обратный) с теплоизоляцией для транспортировки хладоносителя в рабочие зоны с местным охлаждением воздуха, воздухоохладители в рабочих зонах.

При разработке вариантов размещения холодильной машины на дневной поверхности следует решить следующие вопросы: определить технологическую камеру в

околоствольном дворе глубокого горизонта для размещения в ней теплообменного оборудования между контуром высокого давления (в стволе) и контуром низкого давления (на горизонте); предусмотреть возможность прокладки трубопроводов (подающего и обратного) с теплоизоляцией по стволам для подачи охлажденной воды на глубокие горизонты. Представленная схема кондиционирования воздуха, при соответствующем исполнении, позволяет использовать естественное охлаждение хладоносителя в холодный период года со снижением холодопроизводительности или полной остановкой холодильной машины. Для организации такой схемы дополнительно требуются некоторые основные инженерные сооружения. На дневной поверхности — холодильная машина с градирней. В горных выработках: система теплообмена высокого давления, трубопроводы (подающий и обратный) с теплоизоляцией для транспортировки хладоносителя от системы теплообмена высокого давления к испарителю холодильной машины, трубопроводы (подающий и обратный) с теплоизоляцией для транспортировки хладоносителя в рабочие зоны с местным охлаждением воздуха, воздухоохладители в рабочих зонах.

7.3. Разработка программного модуля «Теплофизика»

Для разработки тепловых моделей глубоких шахт и рудников, прогнозирования теплового режима и выбора способов его регулирования разработан программный модуль «Теплофизика», интегрированный в АК «АэроСеть» с удобным графическим интерфейсом.

Модуль «Теплофизика» позволяет производить расчет сопряженной задачи распределения аэродинамических и термодинамических параметров рудничного воздуха в сетевой постановке с учетом всех термодинамических факторов, влияющих на тепловой режим глубоких рудников.

При этом в аналитическом комплексе отсутствуют ограничения на сложность построения топологии вентиляционной сети (количество ветвей и узлов), количество источников тяги и источников тепловыделения, диапазон задаваемых параметров. Архитектура модуля и дизайн программы адаптированы для разработки тепловых моделей шахт на основании либо данных натурных измерений (для существующих шахт или участков), либо проектных данных (для перспективных шахт или участков, согласно разработанной методике).

Параметры численного расчета, общие теплофизические характеристики модели и результаты расчета задаются в программном модуле «Теплофизика», представленном на рисунке 7.9.

Теплофизический модуль реализован с возможностью активации/деактивации учета следующих физических процессов при проведении моделирования:

- гидростатического сжатия воздуха;
- учета работы сил давления;
- учета влияния переменного трения (изменения объемного расхода в зависимости от плотности воздуха);
- инерционности движения воздушных струй и механической сжимаемости воздуха (при расчетах нестационарных процессов воздухо- и теплораспределения);
- влияния тепловых депрессий.

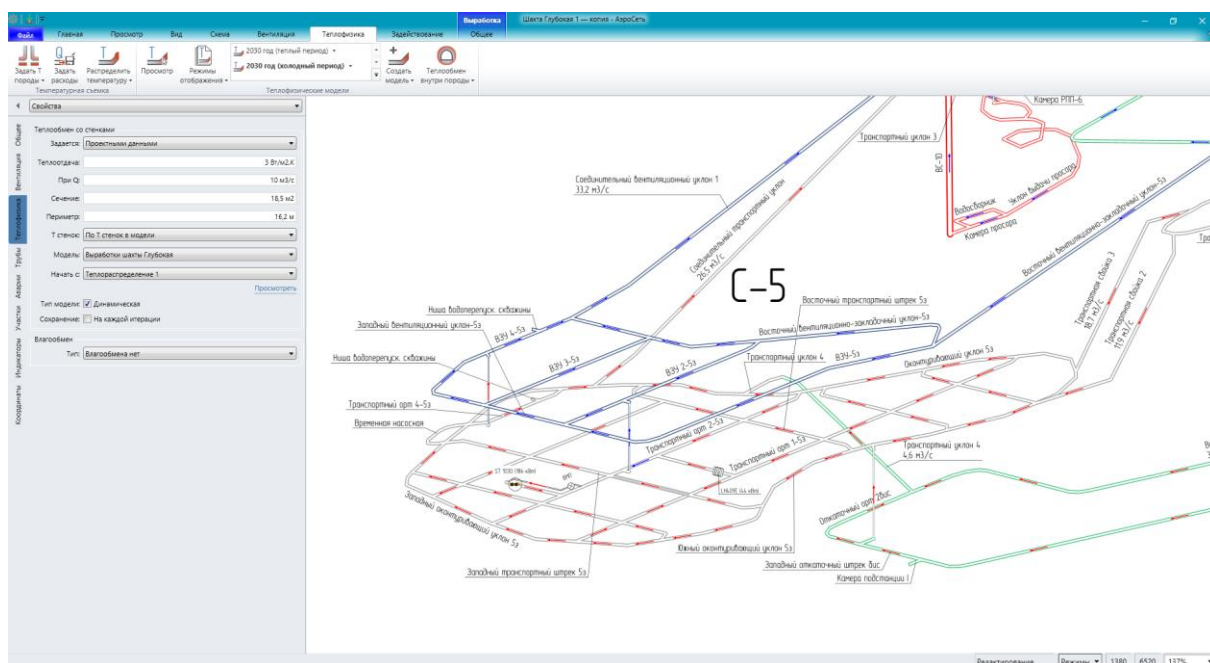


Рисунок 7.9 — Модуль «Теплофизика», интегрированный в АК «АэроСеть»

На рисунке 7.10 представлены рабочие окна модуля, в которых производится задание расчетных параметров численного моделирования.

Для наглядного анализа результатов расчета теплораспределения в горных выработках в программе предусмотрена возможность отображения полей температур для различных ветвей сети с помощью градиентной заливки, пример которой представлен на рисунке 7.11.

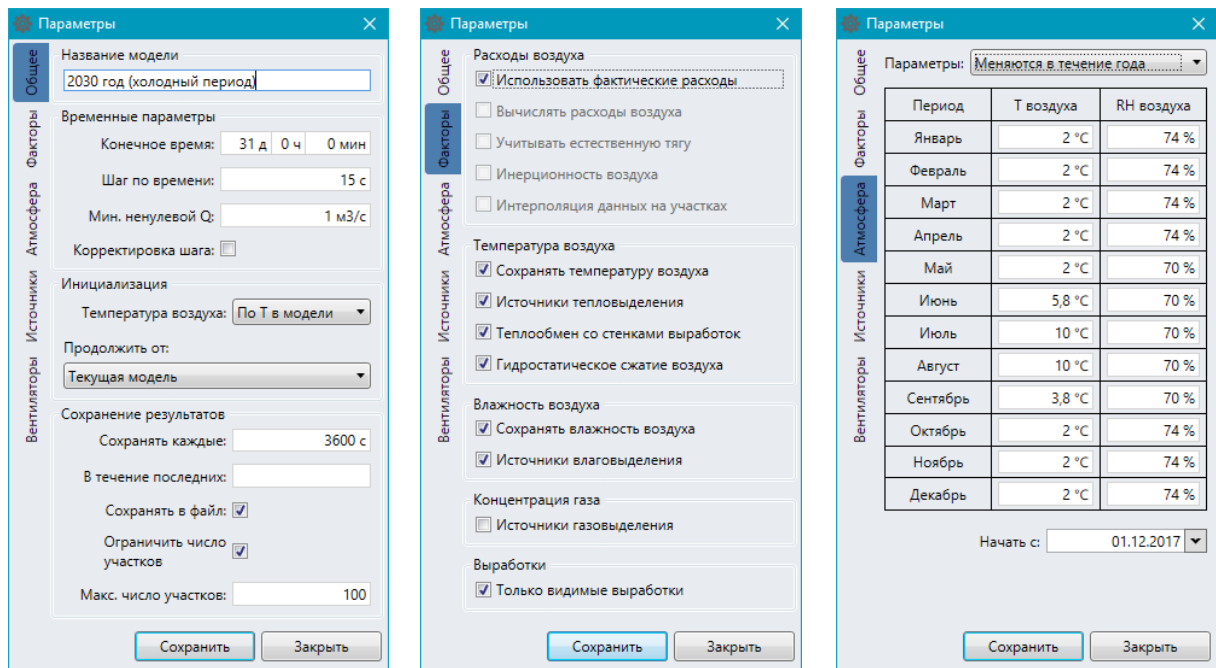


Рисунок 7.10 — Рабочие окна модуля «Теплофизика»

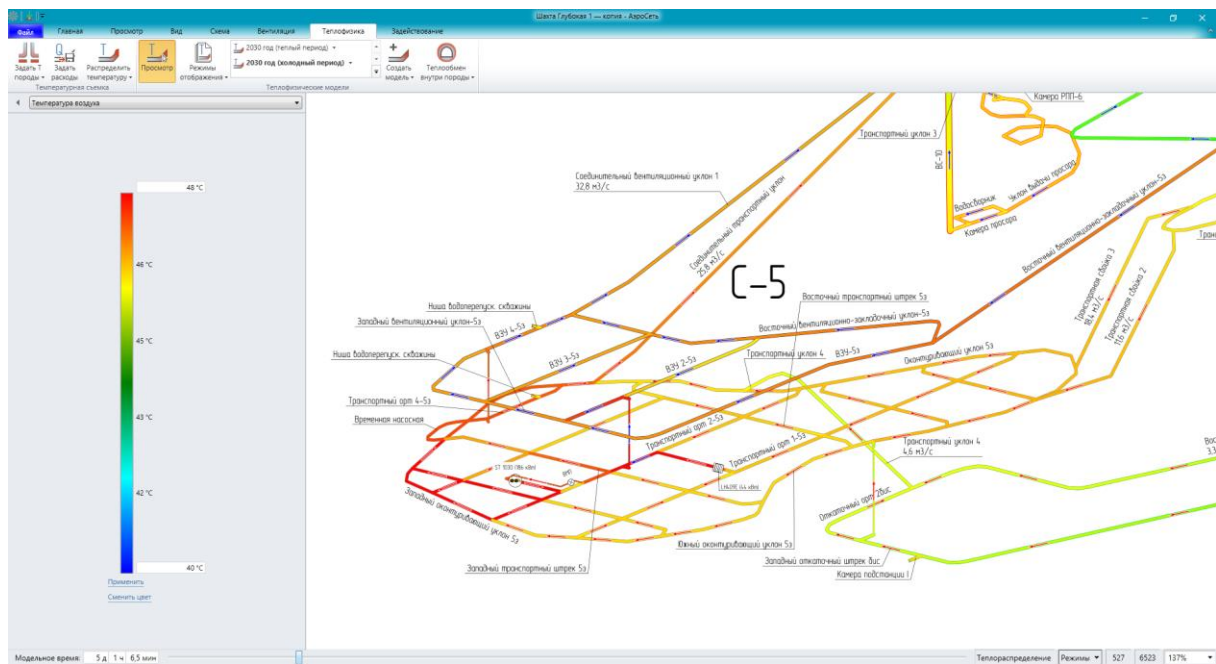


Рисунок 7.11 — Градиентная заливка ветвей вентиляционной сети, отображающая результаты расчета теплораспределения

Кроме этого, в рабочем окне модуля расчета непосредственно производится вывод результатов расчета полей температур и расходов в ветвях вентиляционной сети в виде графиков в пространственных или временных координатах.

Таким образом, представленный модуль расчета позволяет решать две основные задачи при постановке проблем нормализации микроклиматических условий:

- осуществлять расчет теплового режима глубоких шахт с учетом их специфических особенностей;

— производить имитационное моделирование эффективности применения горно- и теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима.

Проекты по разработке технических решений для нормализации микроклиматических условий в горных выработках шахт и рудников, реализованные с помощью теплофизического модуля расчета программы «АэроСеть», показали высокую надежность и эффективность его применения при создании тепловых моделей вентиляционных сетей, расчете теплового режима существующих и проектируемых горных предприятий и имитационном моделировании эффективности применения мероприятий регулирования теплового режима.

На усовершенствованный модулем теплофизического расчета аналитический комплекс «АэроСеть» получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015610589 от 14 января 2015 года.

7.4. Разработка ресурсосберегающей системы нормализации микроклиматических условий в шахте «Глубокая» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»

Разработанные методические, технологические и программные средства применены при разработке ресурсосберегающей системы нормализации микроклиматических условий в шахте «Глубокая» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» [62].

На проектируемой шахте «Глубокая» глубина ведения горных работ достигает 1700-2000 метров, при этом геотермическая ступень в условиях Октябрьского месторождения составляет 40 метров, что обуславливает высокую температуру породного массива. Температура пород достигает +50 °С (максимальная замеренная температура пород по скважине КЗ-1672 на глубине 2007,6 м достигает +53,4 °С), а температура воздуха в летний период года в выработках околоствольного двора без использования поверхностной системы кондиционирования воздуха может превышать +30 °С. Вследствие теплообмена между горными породами и рудничным воздухом, а также применения высокопроизводительного добычного и транспортного оборудования, которое приводит к значительным дополнительным тепловыделениям, температура воздуха в рабочих зонах шахты достигает значения +54 °С. Климат района субарктический, характеризуется отрицательной среднегодовой температурой воздуха (-9,8 °С), продолжительным холодным периодом (248 дней) с сильными морозами и метелями, средняя месячная температура воздуха наиболее холодного месяца -28,2 °С. Продолжительность безморозного периода составляет 117 дней, средняя месячная температура воздуха наиболее теплого месяца +13,7 °С.

На основе представленной методики построения тепловой модели с учетом термодинамических факторов, влияющих на формирование теплового режима шахты «Глубокая», в аналитическом комплексе «АэроСеть» разработаны модели на все периоды ввода в эксплуатацию пусковых комплексов.

На рисунке 7.12 наглядно представлена одна из разработанных тепловых моделей шахты «Глубокая» при максимальном развитии горных работ.

Разработанные тепловые модели пусковых комплексов позволят производить моделирование термодинамических процессов в рудничной атмосфере и породном массиве шахты «Глубокая».

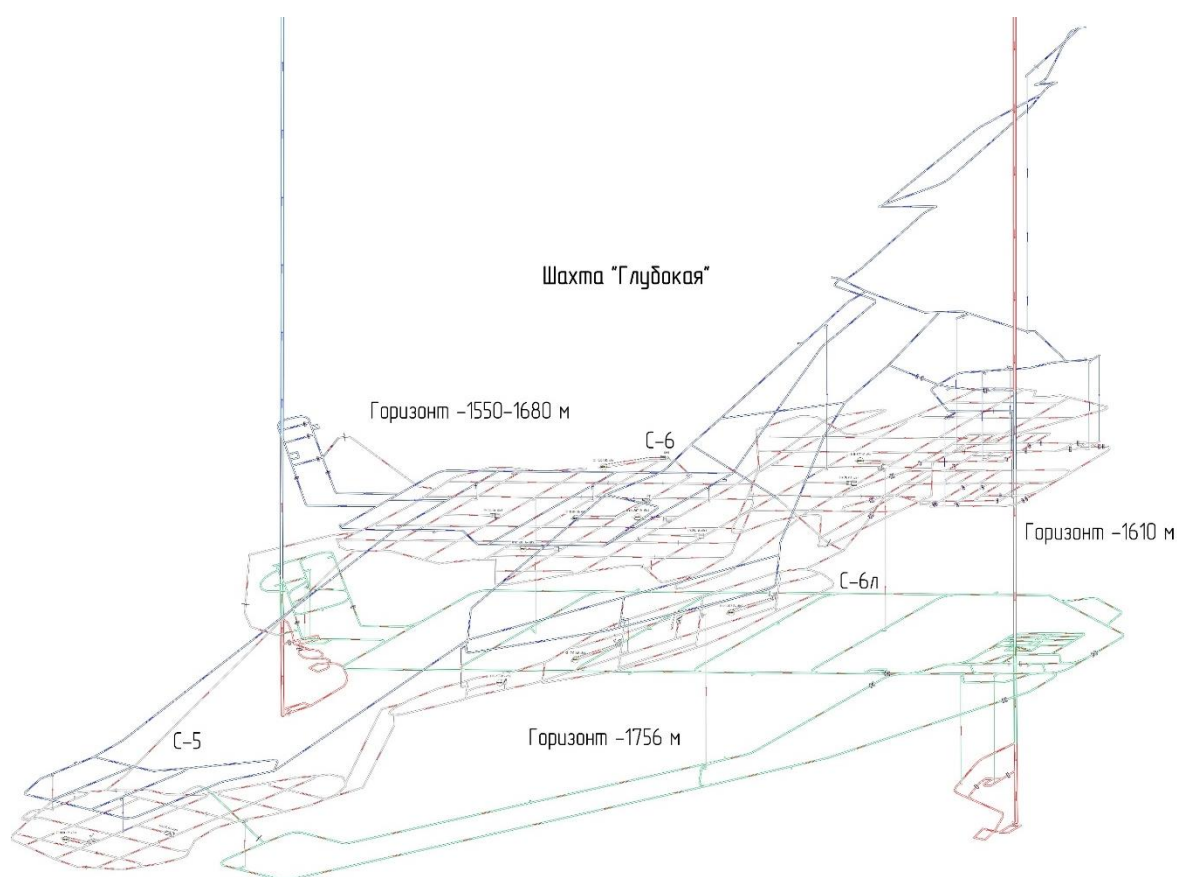


Рисунок 7.12 — Тепловая модель шахты «Глубокая»

На период строительства капитальных горных выработок шахты «Глубокая» прогнозируемая температура воздуха в рабочих зонах с учетом термодинамических факторов, влияющих на формирование неблагоприятных микроклиматических условий в горных выработках, приведена в таблице 7.2.

Таблица 7.2 — Распределение температуры воздуха в рабочих зонах на период строительства капитальных горных выработок

Рабочая зона	Расход, м ³ /с	Температура, °С
Вентиляционно-закладочный горизонт -1550/-1680 м		
ГКР № 1 (TORO-151)	3,6	47,7
ГКР № 2 (Кровлеоборочная машина Utilif-807)	3,6	47,0
Откаточный горизонт -1756 м		
ГКР № 1 (TORO-151)	3,6	51,5
ГКР № 2 (Кровлеоборочная машина Utilif-807)	3,6	48,7
ГКР № 3 (TORO-151)	3,6	45,4
ГКР № 4 (Кровлеоборочная машина Utilif-807)	3,6	42,6
Доставочный горизонт -1610 м		
ГКР № 1 (TORO-151)	3,6	44,1
ГКР № 2 (Кровлеоборочная машина Utilif-807)	3,6	46,2

Согласно результатам моделирования воздух, поступающий на проветривание строящихся горизонтов, достигает температуры +16 °С. Однако из таблицы следует, что во всех рабочих зонах за счет теплообмена воздуха с породным массивом и техногенных источников теплоты наблюдается превышение допустимой температуры воздуха. Максимальное значение температуры воздуха составляет +51,5 °С в капитальной горнопроходческой выработке откаточного горизонта -1756 м.

Температура воздуха в рабочих зонах для V пускового комплекса с учетом термодинамических факторов, влияющих на формирование неблагоприятных микроклиматических условий в горных выработках, приведена в таблице 7.3.

Таблица 7.3 — Распределение температуры воздуха в рабочих зонах V ПК

Рабочая зона	Расход, м ³ /с	Температура, °С
Залежь С-5		
Добычная выработка № 1	7,3	52,2
Подготовительная выработка № 1	9,5	54,7
Залежь С-6		

Рабочая зона	Расход, м ³ /с	Температура, °С
Добычная выработка № 1	7,3	51,8
Добычная выработка № 2	7,3	50,5
Добычная выработка № 3	7,3	49,6
Добычная выработка № 4	7,3	37,8
Подготовительная выработка № 1	9,5	52,2
Подготовительная выработка № 2	9,5	49,7
Подготовительная выработка № 3	4,1	51,5
Подготовительная выработка № 4	4,1	40,8
Залежь С-бл		
Добычная выработка № 1	7,3	47,2
Добычная выработка № 2	7,3	43,8
Подготовительная выработка № 1	9,5	47,2
Подготовительная выработка № 2	4,1	37,4
Технологические камеры		
ГСО	18,5	20,2
Камера зарядки аккумуляторов	3,5	23,5
Пункт заправки	2,1	25,1
Ремонтная база	20,6	22,1
Склад ВМ	8,4	22,5
Склад ГСМ	3,5	25,1

Согласно результатам моделирования воздуха, поступающий на проветривание в горные выработки, достигает температуры +15,7 °С и +16,8 °С на вентиляционно-закладочном и откаточном горизонтах соответственно. Из таблицы следует, что только в выработках околоствольных дворов воздухоподающего ствола СКС-1, и, следовательно, в технологических камерах температура воздуха на период ввода V ПК шахты «Глубокая» не превышает предельно-допустимых значений +26 °С. Во всех остальных рабочих зонах за счет теплообмена воздуха с породным массивом и техногенных источников теплоты наблюдается превышение допустимой температуры воздуха. Максимальное значение температуры воздуха составляет +54,7 °С в подготовительной тупиковой выработке залежи С-5 (наиболее отдаленный участок шахты).

С точки зрения условий труда рабочих к наиболее неблагоприятным участкам шахты относятся рабочие зоны, в которых температура воздуха повышается до сверхнормативных значений.

Обеспечение требуемой температуры воздуха +26 °С требует отведения избыточного теплосодержания от воздушной струи и определяется не только максимальной температурой воздуха, но и его расходом. В связи с этим определено избыточное теплосодержание струи воздуха в рабочих зонах шахты «Глубокая», которое рассчитывалось по следующей формуле

$$I = \rho \cdot c \cdot Q \cdot (T_p - 26^\circ), \quad (7.21)$$

где ρ — плотность воздушной среды, кг/м³;

c — теплоемкость воздуха в сухом состоянии, кДж/кг·°С;

Q — расход воздуха, м³/с;

T_p — прогнозируемое значение температуры воздуха, °С.

Результаты расчета избыточного теплосодержания для сухого воздуха сведены в сравнительную таблицу 7.4.

Таблица 7.4 — Избыточное теплосодержание в рабочих зонах ПК

Пусковой комплекс	Количество рабочих зон	Максимальное значение температуры воздуха, °С	Избыточное теплосодержание для сухого воздуха, кВт
III	12	+43,5	1 304
IV	14	+48,8	2 339
V	14	+54,7	3 235

Прогнозное теплораспределение во всех выработках V ПК шахты представлено на рисунке 7.13.

По результатам расчета можно сделать вывод, что наиболее неблагоприятные условия для горнорабочих формируются в период V ПК, когда шахта «Глубокая» достигнет максимальной проектной мощности. Ухудшение микроклиматических условий в рабочих зонах V ПК связано с увеличением глубины ведения горных работ, а также с разветвлением вентиляционной сети и, как следствие, уменьшением скоростей воздуха в выработках.

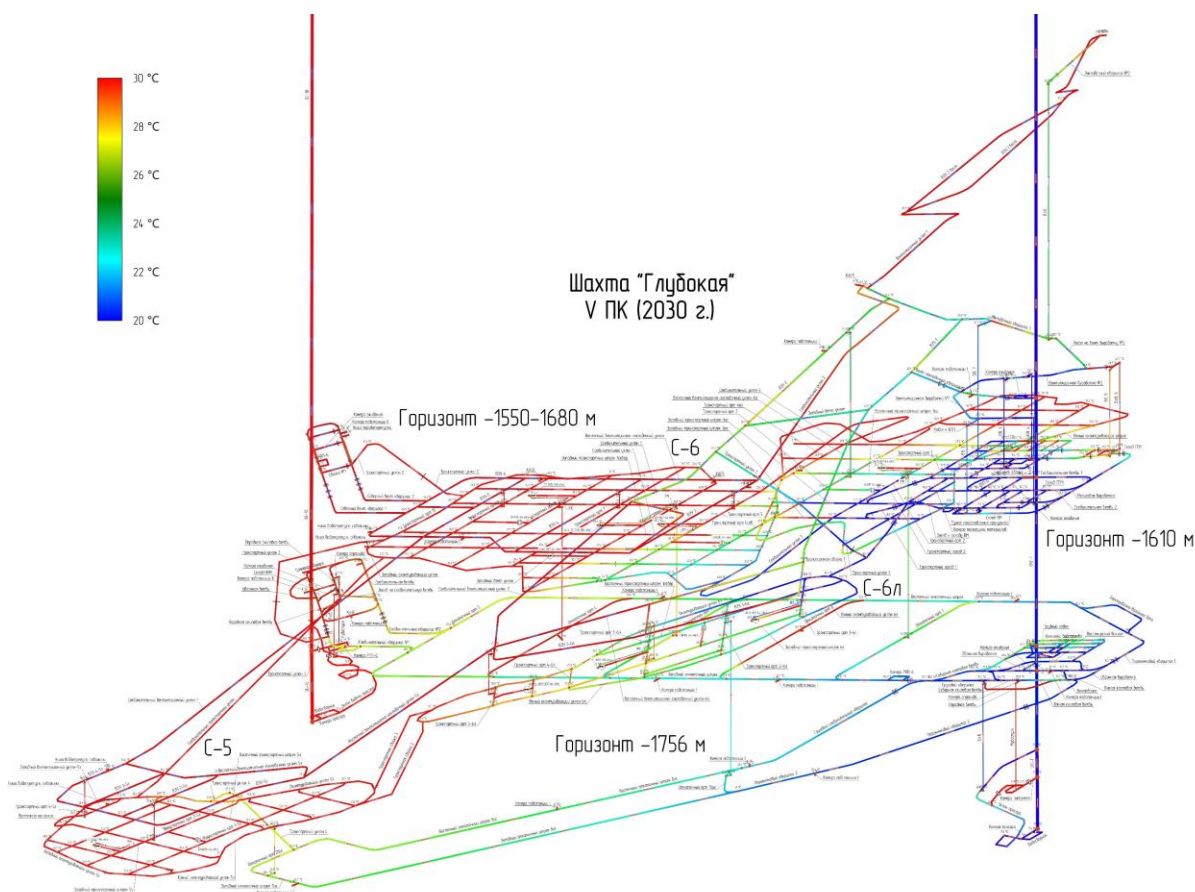


Рисунок 7.13 — Прогнозное распределение температуры на период максимального развития работ

В связи с этим исследование горнотехнических и теплотехнических мероприятий по охлаждению рудничного воздуха в горных выработках шахты для разработки технических решений по обеспечению теплового режима на периоды ввода всех пусковых комплексов в дальнейшем осуществляется в рабочих зонах V ПК. Разработанные технические решения для наиболее неблагоприятных условий позволят в полном объеме нормализовать микроклиматические условия в горных участках шахты «Глубокая» на весь срок ее эксплуатации.

Полученные результаты прогнозного расчета теплораспределения во всех горных выработках шахты «Глубокая» позволяют сформулировать следующие выводы:

- Для всех пусковых комплексов в технологических камерах температура воздуха не превышает предельно-допустимых значений +26 °С.
- В горнопроходческих и добычных выработках на весь период эксплуатации шахты температура воздуха превышает допустимые значения. Максимальные значения температуры наблюдаются в наиболее отдаленных участках шахты за

счет теплообмена воздуха с породным массивом и техногенных источников теплоты.

- Наиболее неблагоприятные условия для горнорабочих сформируются в период эксплуатации V ПК, когда шахта «Глубокая» достигнет максимальной проектной мощности. Для обеспечения нормализации микроклиматических условий в полном объеме дальнейшие исследования горнотехнических и теплотехнических мероприятий по охлаждению рудничного воздуха осуществляются в рабочих зонах V ПК.

На основании результатов численного моделирования проведен сравнительный анализ различных технических мероприятий регулирования теплового режима шахты «Глубокая». В таблице 7.5 представлены способы снижения температуры воздуха и количественные показатели их эффективности.

Таблица 7.5 — Способы снижения температуры воздуха и количественные показатели их эффективности

Способ	Количественные показатели эффективности
Горнотехнические мероприятия	
Увеличение количества воздуха, подаваемого в шахту	Способ эффективен для снижения температуры воздуха в основных воздухоподающих выработках шахты
Теплотехнические мероприятия	
Применение СКВ для охлаждения всего воздуха, поступающего на залежи	Способ не эффективен — обеспечить допустимую температуру воздуха возможно только в неотдаленных участках шахты
Применение СКВ для местного охлаждения рабочих зон	Способ эффективен — позволяет снизить температуру воздуха во всех рабочих зонах

На основании сравнительного анализа установлено, что достичь требуемой температуры воздуха во всех рабочих зонах шахты можно только с учетом местного охлаждения. Кроме того, для обеспечения благоприятных микроклиматических условий в основных воздухоподающих выработках рекомендуется в холодный период года увеличить количество воздуха, подаваемого в шахту. Но в теплый период года (июнь, июль, август) необходимо обеспечить подачу в шахту только расчетного количества воздуха. При этом температура воздуха на входе в воздухоподающий ствол СКС-1 круглогодично будет составлять не более +2 °С.

В результате разработанные горнотехнические и теплотехнические мероприятия совместно с запроектированным поверхностным комплексом кондиционирования воздуха ствола СКС-1 позволят нормализовать микроклиматические условия в рабочих зонах шахты «Глубокая».

Результаты численного расчета температуры воздуха в выработках V пускового комплекса шахты «Глубокая» при применении местных систем охлаждения воздуха представлены на рисунке 7.14.

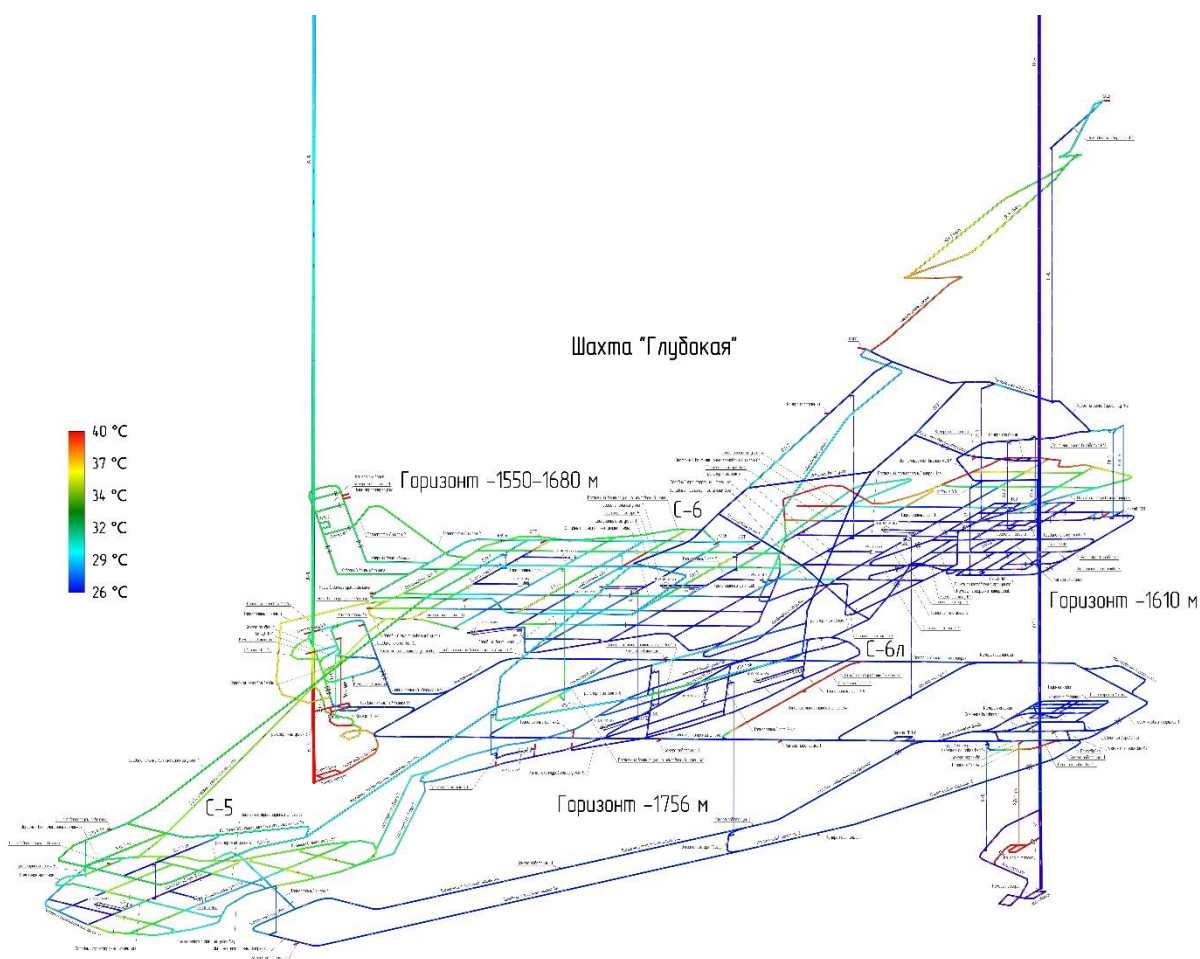


Рисунок 7.14 — Распределение температуры воздуха в шахте «Глубокая» при применении местного охлаждения воздуха

В таблице 7.6 представлены результаты расчета микроклиматических параметров воздуха в рабочих зонах шахты «Глубокая» на период эксплуатации V ПК с учетом подачи $428 \text{ м}^3/\text{с}$ воздуха.

Таблица 7.6 — Параметры воздуха на период эксплуатации V ПК шахты «Глубокая» с учетом подачи 428 м³/с воздуха

Рабочая зона	Расход, м ³ /с	Температура входящего воздуха, °С		Температура исходящего воздуха, °С	
		Начальное проветривание	12 месяцев с начала проветривания	Только поверхностное охлаждение	Поверхностное и местное охлаждение
Залежь С-5					
Добычная выработка № 1	7,3	38,2	29,5	39,3	16,9
Подготовительная выработка № 1	9,5	40,8	32,2	44,7	23,7
Залежь С-6					
Добычная выработка № 1	7,3	41,6	33,7	44,0	21,5
Добычная выработка № 2	7,3	41,5	32,7	44,5	20,0
Добычная выработка № 3	7,3	34,0	26,5	37,5	23,6
Добычная выработка № 4	7,3	21,7	18,6	29,4	23,4
Подготовительная выработка № 1	9,5	36,9	28,4	41,7	18,9
Подготовительная выработка № 2	9,5	33,2	25,8	37,3	20,2
Подготовительная выработка № 3	4,1	37,3	29,3	41,1	20,2
Подготовительная выработка № 4	4,1	33,3	26,7	36,5	22,0
Залежь С-бл					
Добычная выработка № 1	7,3	35,9	27,5	36,3	21,6
Добычная выработка № 2	7,3	29,7	23,1	33,1	24,0
Подготовительная выработка № 1	9,5	33,3	25,6	36,5	19,2
Подготовительная выработка № 2	4,1	27,2	21,6	31,6	24,4

В таблице 7.7 приведены требуемые холодильные мощности для обеспечения допустимой температуры воздуха в рабочих зонах V пускового комплекса шахты «Глубокая».

Таблица 7.7 — Требуемые холодильные мощности для обеспечения допустимой температуры воздуха в рабочих зонах V пускового комплекса шахты «Глубокая»

Название участка	Расход воздуха, м ³ /с	Холодильная мощность, кВт
Залежь С-5		
Добычная выработка № 1	7,3	430
Подготовительная выработка № 1	9,5	877
Всего для залежи С-5	16,8	1 307
Залежь С-6		
Добычная выработка № 1	7,3	601
Добычная выработка № 2	7,3	636
Добычная выработка № 3	7,3	324
Добычная выработка № 4	7,3	100
Подготовительная выработка № 1	9,5	691
Подготовительная выработка № 2	9,5	481
Подготовительная выработка № 3	4,1	278
Подготовительная выработка № 4	4,1	224
Всего для залежи С-6:	56,4	3 334
Залежь С-бл		
Добычная выработка № 1	7,3	358
Добычная выработка № 2	7,3	212
Подготовительная выработка № 1	9,5	473
Подготовительная выработка № 2	4,1	100
Всего для залежи С-бл:	28,2	1 143
Всего для шахты «Глубокая»:		5 783

В результате для нормализации микроклиматических условий в горных выработках V пускового комплекса шахты «Глубокая» требуемая холодильная мощность должна составлять 5 783 кВт.

Следует отметить, что использование систем кондиционирования воздуха предполагает многовариантность способов размещения и режимов использования средств охлаждения воздуха и сброса теплоты. Для обеспечения комфортных и безопасных условий труда необходимо разработать и обосновать общие технологические схемы расстановки оборудования системы кондиционирования воздуха в подземных выработках шахты «Глубокая».

При разработке вариантов размещения холодильной машины в горных выработках глубокого горизонта следует решить следующие основные вопросы: определить располагаемый теплоутилизационный потенциал сопутствующих технологических процессов: вентиляции, шахтного водоотлива; рассмотреть возможность прокладки трубопроводов (подающего и обратного) с теплоизоляцией по стволу (воздухоподающему или вентиляционному) для обособленного отведения теплоизбытков от работы подземной холодильной машины посредством градирни, расположенной на дневной поверхности.

В рассматриваемые периоды развития горных работ на шахте «Глубокая» на периоды эксплуатации пусковых комплексов III ПК, IV ПК и V ПК для обеспечения безопасных микроклиматических условий ведения очистных и подготовительных работ, а также работ по проведению горно-капитальных выработок (для периодов III ПК и IV ПК) технически возможны к применению следующие варианты систем кондиционирования рудничного воздуха шахты «Глубокая», обеспечивающие требуемую холодопроизводительность на перспективное развитие горных работ.

Таблица 7.8 — Требуемая холодопроизводительность

Параметр	III ПК	IV ПК	V ПК
Требуемая холодопроизводительность, кВт.	2 545	4 765	5 783
Количество воздухоохладителей, шт.	12	14	14

При определении холодильной мощности центральной холодильной машины в проекте необходимо провести расчеты теплоступлений при транспортировке хладоносителя от испарителя холодильной машины (или промежуточного теплообменника) до местных воздухоохладителей, установленных в рабочих зонах шахты «Глубокая».

Вариант I. Подземная холодильная машина со сбросом тепловыделений в проектируемый шахтный водоотлив. Применение такого варианта системы кондиционирования воздуха потребует обеспечить непрерывную циркуляцию воды через водосборник с применением системы очистки шахтной воды, оборудовать технологическую камеру для холодильной машины и смежного технологического оборудования в горных выработках доставочного (г. -1610 м) или откаточного (г. -1756 м) горизонтов. Для реализации такой схемы работы холодильной машины потребуется обеспечить следующие технологические условия работы водосборника шахты «Глубокая».

Таблица 7.9 — Необходимые условия для реализации Варианта I

Участок	Параметр	III ПК	IV ПК	V ПК
Главный водоотлив шахты «Глубокая»	Расход воды (не менее), м ³ /ч	134,8	252,4	306,3
	Естественная температура воды (не более), °С	30	30	30
	Предельная температура воды (не менее), °С	55	55	55
Ствол СКС-1	Теплоизоляция трубопроводов	требуется	требуется	требуется

Вариант II. Подземная холодильная машина со сбросом тепловыделений на дневной поверхности. Эта схема требует прокладки по стволу трубопроводов (подающего и обратного) с параметрами, приведенными в таблице 7.10, строительства градири на промплощадке ствола ВС-10, оборудования технологической камеры в горных выработках доставочного (г. -1610 м) или откаточного (г. -1756 м) горизонтов.

Таблица 7.10 — Необходимые условия для реализации Варианта II

Участок	Параметр	III ПК	IV ПК	V ПК
Ствол ВС-10	Диаметр трубопроводов (внутренний), мм	230	310	350
	Теплоизоляция трубопроводов	требуется	требуется	требуется
Градирия	Температура воды на входе, °С	35	35	35
	Температура воды на выходе, °С	22	22	22
	Расход воды, м ³ /ч	246,3	461,1	559,6
	Мощность охлаждения воды, кВт	4 500	8 100	9 500

Вариант III. Холодильная машина на дневной поверхности со сбросом тепловыделений в атмосферный воздух. Такая схема требует прокладки по стволу трубопроводов (подающего и обратного) с параметрами, приведенными в таблице 7.11, размещения на промплощадке холодильной машины с градирией.

Таблица 7.11 — Необходимые условия для реализации Варианта III

Участок	Параметр	III ПК	IV ПК	V ПК
Ствол ВС-10	Диаметр трубопроводов (внутренний), мм	210	265	315
	Теплоизоляция трубопроводов	требуется	требуется	требуется
	Расход воды, м ³ /ч	209,3	391,9	475,6

Выбор той или иной схемы кондиционирования рудничного воздуха зависит от климатических условий района строительства, технологического процесса добычи, вентиляционных режимов, сроков ввода мощностей в эксплуатацию, темпов отработки месторождения, доступности энергоресурсов и определяется на основании технико-экономического сравнения вариантов систем.

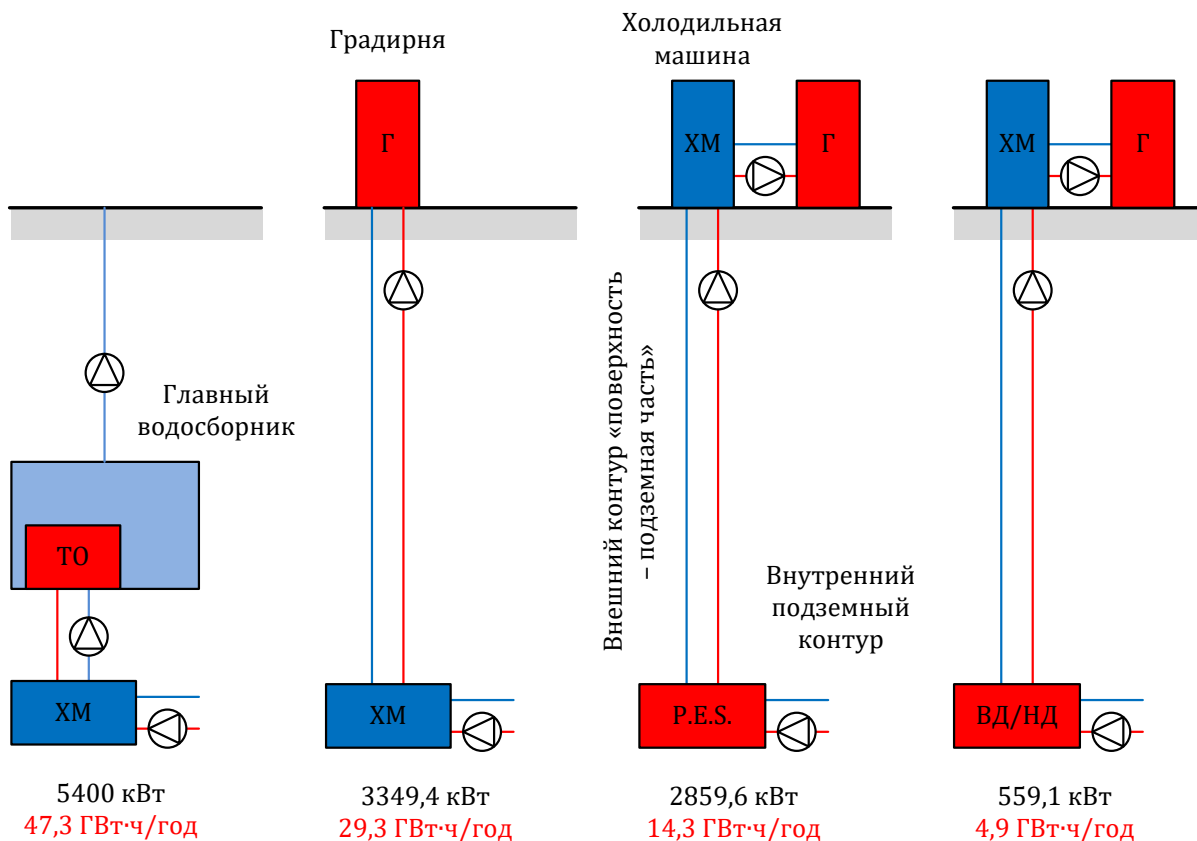


Рисунок 7.15 — Основные параметры схем отведения тепловой энергии от работы холодильных машин

Таблица 7.12 — Параметры систем кондиционирования воздуха шахты «Глубокая»

Агрегат	Параметр	Единицы измерения	Подземная ХМ		Поверхностная ХМ
			Теплообменник в водосборнике	Градирия на поверхности	
Насос (горизонт/поверхность)	Мощность	кВт	1546,3	132,1	112,3
	Годовое потребление	ГВт·ч/год	13,5	1,2	1,0
Холодильная машина	Мощность	кВт	2544,5	2099,2	1590,3
	Годовое потребление	ГВт·ч/год	22,3	18,4	4,1
Промежуточный насос	Мощность	кВт	0,0	0,0	80,3
	Годовое потребление	ГВт·ч/год	0,0	0,0	0,7
Насос контура воздухоохлаждителей	Мощность	кВт	366,8	341,6	513,9
	Годовое потребление	ГВт·ч/год	3,2	3,0	4,5
Вентиляторы воздухоохлаждителей	Мощность	кВт	550,0	550,0	550,0
	Годовое потребление	ГВт·ч/год	4,8	4,8	4,8
Суммарно	Установленная мощность	кВт	5007,6	3122,9	2846,8
	Годовое потребление	ГВт·ч/год	43,9	27,4	15,1

Система центрального холодоснабжения шахты «Глубокая» на период эксплуатации V ПК должна обеспечивать участки ведения подготовительно-нарезных и очистных работ на доставочном горизонте залежей С-5, С-6 и С-6л.

Согласно прогнозному распределению температур воздуха в горных выработках шахты «Глубокая», выполненному на разработанных тепловых моделях, установлено, что максимальные температуры воздуха в горно-подготовительных и добычных выработках без применения мероприятий по снижению температур воздуха достигают:

- на период ввода III ПК — +43,5 °С и +40,9 °С соответственно;
- на период ввода IV ПК — +48,8 °С и +42,5 °С соответственно;

— на период ввода V ПК — +54,7 °С и +52,2 °С соответственно.

В выработках околоствольных дворов воздухоподающего ствола СКС-1, и, следовательно, в технологических камерах шахты «Глубокая» температура воздуха при перспективном развитии горных работ не превысит предельно-допустимых значений +26 °С.

На основании исследования горнотехнических и теплотехнических мероприятий установлено, что единственным техническим решением, обеспечивающим снижение температуры воздуха в рабочих зонах до +26 °С является местное охлаждение, то есть размещение в каждой рабочей зоне воздухоохладителей.

Согласно выполненным расчетам, требуемые суммарные холодильные мощности для охлаждения воздуха, составляют:

- на период ввода III ПК — 2 545 кВт;
- на период ввода IV ПК — 4 765 кВт;
- на период ввода V ПК — 5 783 кВт.

Определено, что увеличение количества воздуха, поступающего для проветривания выработок шахты «Глубокая» совместно с запроектированным поверхностным комплексом кондиционирования воздуха ствола СКС-1, позволит расширить зону допустимых «Правилами безопасности...» и СанПиН 2.2.4.548-96 температур воздуха в основных воздухоподающих горных выработках. В результате для наиболее эффективного применения поверхностной системы кондиционирования воздуха, установленной на стволе СКС-1, необходимо в холодный период года предусмотреть увеличение подаваемого количества воздуха:

- на период ввода III ПК до 383 м³/с;
- на период ввода IV ПК до 386 м³/с;
- на период ввода V ПК до 428 м³/с.

В ходе разработки и обоснования технологических схем кондиционирования воздуха установлено, что для нормализации микроклиматических условий в горных выработках шахты «Глубокая» технически возможны к применению три варианта систем кондиционирования рудничного воздуха, обеспечивающие требуемую холодопроизводительность на перспективное развитие горных работ:

1. Подземная холодильная машина со сбросом тепловыделений в проектируемый шахтный водоотлив.
2. Подземная холодильная машина со сбросом тепловыделений на дневной поверхности.

3. Холодильная машина на дневной поверхности со сбросом тепловыделений в атмосферный воздух.

Установлено, что наиболее целесообразным и выгодным вариантом, применительно к горнотехническим условиям шахты «Глубокая», является поверхностное размещение холодильной машины с градирней на промплощадке ствола ВС-10.

Для рабочих зон залежей С-5, С-6, С-6л шахты «Глубокая», где не предусматривается постоянное нахождение персонала, согласно «Правилам безопасности...» режим пребывания и работы регламентируется в соответствии с санитарно-эпидемиологическими правилами и нормами СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» и СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».

При отработке залежей С-5, С-6, С-6л также требуется предусмотреть применение горных машин с кабинами, оборудованными системами кондиционирования.

7.5. Выводы

В результате проведенных исследований, направленных на разработку научно-технологических основ построения ресурсосберегающих систем нормализации микроклиматических условий в глубоких рудниках, можно сделать следующие выводы:

- в рамках действующих нормативных документов можно разработать систему нормирования микроклиматических условий в горных выработках, учитывающую комплексное влияние температуры, скорости движения и относительной влажности воздуха на тепловую нагрузку организма и реализующую защиту временем от вредного теплового фактора;
- построение комплексных ресурсосберегающих систем нормализации микроклиматических условий в горных выработках осуществляется на основе метода вариантов, позволяющего выбрать и оптимальным образом комплексировать горно- и теплотехнические способы регулирования теплового режима шахт и рудников по критериям эффективности и ресурсосбережения;
- разработанный теплофизический модуль аналитического комплекса «Аэро-Сеть», реализующий разработанные математические модели расчета микроклиматических параметров воздуха, позволяет в удобном графическом интерфейсе производить построение тепловых моделей глубоких рудников и производить

многовариантное моделирование эффективности способов нормализации микроклимата;

- выбор и расчет способов отведения избыточных тепловыделений при кондиционировании воздуха в условиях глубоких рудников, должен учитывать все возможные варианты размещения холодильных машин и способов отведения избыточных тепловыделений согласно разработанной классификации;
- произведен прогноз теплового режима и обоснована комплексная система нормализации микроклимата для условий шахты «Глубокая» рудника «Скалистый» ПАО «ГМК «Норильский никель» при отработке глубоких залежей С-2, С-5, С-5л, С-6 и С-6л Талнахского месторождения медно-никелевых сульфидных руд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

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

полезных ископаемых в переходном интервале глубин с температурой массива горных пород до +26 °С.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.С. СССР № 1469177 от 30.03.89 г. «Способ кондиционирования воздуха в выработках выемочного участка глубокой шахты» — авторы В.А. Кузин, А.А. Мартынов, Г.М. Цурпал, А.С. Розенберг.
2. А.С. СССР № 1516604 от 23.10.89 «Устройство охлаждения воздуха в горной выработке» — авторы А.К Яковенко, Г.В. Аверин, и М.В. Юцкевич.
3. Абрамов Ф.А., Бойко В.А. Автоматизация проветривания шахт. — Киев: Наукова думка, 1967.
4. Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святный В.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии. — Киев: Наукова думка, 1981. — 284 с.
5. Алабьев В.Р. Основные направления развития способов и средств охлаждения воздуха в угольных шахтах Украины // Вестник Забайкальского государственного университета — Чита: ЗабГУ, 2014, № 6. — с. 35-46.
6. Алабьев В.Р. Учет потерь холода в шахтных системах кондиционирования воздуха и их влияние на тепловые условия в горных выработках // Вестник Забайкальского государственного университета — Чита: ЗабГУ, 2014, № 5. — с. 36-44.
7. Андриющенко В.Н., Захаров Е.П. Улучшение климатических условий труда в глубоких шахтах теплоизоляцией горных пород. — Известия ВУЗов. Горный журнал, 1974, № 6, с. 72-76.
8. Аренс В.Ж., Дмитриев А.П., Дядькин Ю.Д. и др. Теплофизические аспекты освоения ресурсов недр. — Л.: Недра, Л.О., 1988. — 336 с.
9. Баев Х.А. Основные дифференциальные уравнения процессов самовозгорания угля. — В кн.: Вопросы безопасности в угольных шахтах. /Сборник научн. трудов МакНИИ. — М.: Недра, 1969, с. 77-88.
10. Байжанов С.С. Совершенствование технологии нагрева воздуха в системах вентиляции угольных и рудных шахт. — Караганда, 1982. — 172 с.
11. Балтайтис В.Я., Клещунов П.П., Гринь Г.В. Определение времени остывания горного массива после нагревания его подземным пожаром. — Известия ВУЗов. Горный журнал, 1970, № 2, с. 56-59.
12. Бобров А.И., Аверин Г.В. Теоретические основы переноса импульса, теплоты и примеси в горных выработках. — Макеевка-Донбасс: Изд-во МакНИИ, 1994. — 270 с.
13. Богословский В.Н. Отопление и вентиляция / Богословский В.Н. — Часть II. — М.: Стройиздат. — 1976, с. 512.

14. Богоявленский В.А. Особенности теплообмена в очистном забое и их учет при тепловых расчетах. Труды семинара по горной теплотехнике, вып. 4. — Изд-во АН УССР, 1961.
15. Бойко В.А., Бойко О.А. Разработка способа и средств формирования теплозащитной оболочки горных выработок глубокой шахты и оценка влияния ее параметров на теплоприток из горного массива: материалы международной конференции «Форум горняков 2009». — Днепропетровск: РВК НГУ, 2009. — с. 57-73.
16. Бойко О.А., Бойко В.А. Исследование влияния теплоуравняющей оболочки пород горного массива на величину притока теплоты в горную выработку глубокой шахты Донбасса // Науковий вісник НГУ. — Днепропетровск, 2011, №3 — с. 98-106.
17. Бокий Б.В. Методика обоснования параметров снижения температуры воздуха шахтной атмосферы призабойной зоны тупиковых подготовительных выработок / Б.В. Бокий, С.В. Тынына, В.Р. Алабьев // Вестник Забайкальского государственного университета — Чита: ЗабГУ, 2014, № 12, V 115 — с. 4-11.
18. Бокий Б.В. Методика обоснования параметров способа снижения температуры воздуха шахтной атмосферы призабойной зоны тупиковых подготовительных выработок / Б.В. Бокий, В.Р. Алабьев, С.В. Тынына // Вестник Забайкальского государственного университета — Чита: ЗабГУ, 2014, № 12. — с. 4-11.
19. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. — 416 с.
20. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. — М.: Недра, 1980. — 360 с.
21. Брайчева Н.А., Добрянский Ю.П., Щербань А.Н. К постановке задач о тепловом режиме теплоносителя, движущегося в горной выработке. — Промышленная теплотехника, 1986, т. 8, № 1, с. 19-22.
22. Брайчева Н.А., Черняк В.П., Щербань А.Н. Методы расчета температуры вентиляционного воздуха подземных сооружений. — Киев: Наукова думка, 1981. — 184 с.
23. Бурцев А.Н., Постольник Ю.С. Аналитическое исследование теплообмена между бесконечным массивом и цилиндрической полостью с нестационарной температурой среды. — Известия ВУЗов. Горный журнал, 1978, № 9, с. 63-67.
24. Васенин И.М. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н. Костеренко // Компьютерные исследова-

- ния и моделирование. — Ижевск: Изд-во Ижевского института компьютерных исследований. — 2011. — Том 3, № 2. — с. 155-163.
25. Величко А.Е. Прогноз тепловых условий в выработках глубоких шахт при аварийном нарушении режима проветривания. — В кн.: Борьба с высокими температурами в угольных шахтах и рудниках. /Тезисы докладов Всесоюзн. научно-технического совещания, Донецк, 1974. — Макеевка-Донбасс: Изд-во МакНИИ1974, с. 49-50.
 26. Величко А.Е., Дубина П.П., Близнюк В.Г. Анализ методов теплового расчёта горных выработок. — Промышленная теплотехника, 1984, т.6, № 1, с. 22-30.
 27. Величко А.Е., Крамаров А.С. Разработка зависимостей прогноза тепловых условий в тупиковых выработках без применения кондиционирования воздуха. — В кн.: Охлаждение воздуха в угольных шахтах. Выпуск 3. /Сборник научн. трудов. — Макеевка-Донбасс: Изд-во МакНИИ, 1973, с. 34-38.
 28. Величко А.Е., Кузин В.А., Яковенко А.К. Оценка существующих зависимостей теплового расчёта воздуха в горных выработках // Кондиционирование рудничного воздуха в глубоких шахтах, выпуск 6. Сборник научных трудов. — Макеевка-Донбасс: Изд-во МакНИИ, 1978. — с. 19-24.
 29. Волощук С.Н., Андреев Г.Г., Мельниченко В.М. Кондиционирование воздуха на глубоком руднике. — М.: Недра, 1975. — 150 с.
 30. Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. — М.: 1966, — 252 с.
 31. Воропаев А.Ф. Управление тепловым режимом в глубоких шахтах. — М.: Госгортехиздат, 1961. — 248 с.
 32. Воскобойников В.И. Исследование параметров вентиляционной струи, проходящей через очаг подземного пожара. — В книге: Труды Семинара по горной теплотехнике, выпуск 4. — Киев: Изд-во АН УССР, 1962, с. 42-48.
 33. Вяльцев М.М. Исследование теплового поля вокруг стволов шахт с исходящей струей воздуха. — В кн.: Вопросы повышения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых /Труды Новочеркасского политехнического университета, т. 256. — Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1972, с. 59-67.
 34. Галицын А.С. Краевые задачи теплофизики подземных сооружений. — Киев: Наукова думка, 1983. — 236 с.

35. Галкин А.Ф. Прогноз и выбор оптимальных параметров теплового режима при строительстве, эксплуатации и комплексном использовании горных выработок в криолитозоне: дисс... д-ра техн. наук. — Санкт-Петербург, 2009. — 357 с.
36. Галкин А.Ф., Киселев В.В., Курилко А.С. Набрызгбетонная теплозащитная крепь. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. — 164 с.
37. Гендлер С.Г. Исследование теплового режима очистных выработок глубоких рудников Октябрьского месторождения при системах разработки с твердеющей закладкой: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. — Ленинград, 1976. — 20 с.
38. Гендлер С.Г. Особенности тепловых расчетов горных выработок при системах разработки с твердеющей закладкой / Известия высших учебных заведений. Горный журнал. №11 — 1981 г. — с. 19.
39. Гендлер С.Г. Тепловой режим подземных сооружений. — Л.: ЛГИ им. Г.В. Плеханова, 1987. — 102 с.
40. Гендлер С.Г. Управление тепловым режимом подземных сооружений глубокого заложения при переменных аэротермодинамических параметрах воздушного потока: автореферат дисс. ... д-ра техн. наук. — Санкт-Петербург, 1996. — 43 с.
41. Гончаров С.А., Дмитриев А.П. Термодинамические процессы в горных породах. — М.: Недра, 1990. — 360 с.
42. Горноспасательное дело. Выпуск 4. / Сборник научных трудов. — Донецк: ВНИИГД, 1971. — 160 с.
43. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. — 1973. — с. 228.
44. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке (методы планирования эксперимента). — М.: Мир, 1981. — 448 с.
45. Довгий А.Е., Яковенко А.К., Бодня С.Ф. Некоторые результаты исследований теплового режима в горных выработках и меры по повышению эффективности местного охлаждения воздуха в глубоких шахтах. — В кн.: [19], с. 37-43.
46. Дуганов Г.В., Баратов Э.И. Тепловой режим рудников. — М.: Госгортехиздат, 1963. — 144 с.
47. Дуганов Г.В., Исследование рудничного климата, способов и средств кондиционирования воздуха в глубоких шахтах Кривбасса. Труды семинара по горной теплотехнике, выпуску 1. — Изд-во АН УССР, 1958.

48. Дударь Е.С. Исследование процессов теплопереноса в калийных рудниках и конденсации влаги в шахтной вентиляционной сети: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Тула, 2011. — 22 с.
49. Дударь О.И., Дударь Е.С., Мохирев Н.Н. Математическая модель процесса конденсации влаги при движении воздуха в вентиляционной сети калийного рудника // Информация, инновации, инвестиции: материалы всерос. конф. — Пермь, 2003. — с. 163-164.
50. Дядькин Ю.Д. Борьба с высокими температурами в глубоких шахтах и рудниках. — М.: Углетехиздат, 1957. — 80 с.
51. Дядькин Ю.Д. Методика теплового расчёта шахт и рудников в сложных условиях. — ФТПРПИ, 1973, № 5, с. 92-100.
52. Дядькин Ю.Д. О методах тепловых расчетов рудничного воздуха. Научные доклады высшей школы. «Горное дело», 1958, №1.
53. Дядькин Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. — М.: Недра, 1968. — 256 с.
54. Дядькин Ю.Д., Шувалов Ю.В. Отчет о НИР № 17 х/д «Разработка единой методики тепловых расчетов шахт» / Заключительный этап. — Л.: ЛГИ, 1976. — 96 с.
55. Дядькин Ю.Д., Шувалов Ю.В., Гендлер С.Г. Тепловые процессы в горных выработках. — Л.: Изд-во ЛГИ, 1978. — 104 с.
56. Дядькин Ю.Д., Шувалов Ю.В., Тимофеевский Л.С. Горная теплофизика (Регулирование теплового режима шахт и рудников) — Л.: Изд-во ЛГИ, 1976. — 96 с.
57. Ершов Э.Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. — М.: Изд-во МГУ, 1979. — 213 с.
58. Жесткова Т.Н. Формирование криогенного строения грунтов. — М.: Наука, 1982. — 215 с.
59. Журавленко В.Я., Шелиманов В.А. Охлаждение воздуха в лавах шахт глубиной свыше 1200 метров. Труды семинара по горной теплотехнике, выпуск 3. — Изд-во АН УССР, 1961.
60. Зайцев А.В. Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: дис.... канд. техн. наук. — Пермь, 2013.
61. Зайцев А.В. Исследование критериев нормирования микроклиматических условий в горных выработках / А.В. Зайцев, М.А. Семин, Ю.А. Клюкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — МГГУ, 2015. — № 12. — С. 151-156.

62. Зайцев А.В. Теплотехнические системы нормализации микроклиматических параметров воздуха в глубоких рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» / А.В. Зайцев, Л.Ю. Левин, С.В. Бутаков, М.А. Семин // Горный журнал. — Москва, 2018. — № 6. — С. 34-39.
63. Заславский И.Ю., Быков А.В., Компанец В.Ф. Набрызгбетонная крепь. — М.: Недра, 1986 г. — 198 с.
64. Заславский Ю.З., Зорин А.И., Черняк И.Л. Расчеты параметров крепи глубоких шахт. — Киев: Техника, 1972. — 155 с.
65. Заслов В.Я, Атманских С.А., Беляев С.Г. Механизация возведения анкерной и набрызгбетонной крепи в горных выработках. М.: НИИинформтяжмаш, 1971. — 52 с.
66. Землянский В.И., Землянский И.Я., Волохов И.И. Противотепловые костюмы ТК-60М и ПТК-80. — В кн.: Горноспасательное дело. /Сб-к научн. работ. — Донецк: НПО "Респиратор", 1992, с. 66-71.
67. Иванников А.Л. Математическое моделирование шахтных вентиляционных сетей, содержащих выработки с неустойчивым проветриванием: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — 2009.
68. Исаевич А.Г. Повторное использование воздуха при проветривании калийных рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2005. — с. 232-235.
69. Исаченко В.П. Теплопередача: учебник для технических специальностей высших учебных заведений. — М.: Энергия, 1981. — 415 с.
70. Казаков Б.П. Оптимизация компоновки теплообменных модулей в системах кондиционирования рудничного воздуха / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ. — № 7, 2015. — с. 116-126.
71. Казаков, Б.П. Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Записки Горного института. — Санкт-Петербург, 2017. — Т. 223. — С. 116-124.
72. Казаков Б.П. Формирование и нормализация микроклимата подземных рудников при разработке месторождений калийных солей: дис.... докт. техн. наук. Пермь, 2001.
73. Казаков Б.П. Формирование микроклиматических параметров атмосферы в воздухоподающих стволах и главных выработках глубоких рудников / Казаков Б.П.,

- Зайцев А.В., Семин М.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М.: Горная книга. — 2013. №8. — с. 167-171.
74. Казаков Б.П., Шалимов А.В. О температуре крепи вентиляционных стволов при реверсировании главных вентиляторных установок // Безопасность труда в промышленности, № 10, 2006. — с. 12-14.
75. Карелин В.Н. Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников / В.Н. Карелин, А.В. Кравченко, Л.Ю. Левин, Б.П. Казаков, А.В. Зайцев // Горный журнал. — Москва, 2013, №6. — С. 65-68.
76. Карпов А.М., Кирин Б.Ф., Пережилов А.Е. Рециркуляция в подготовительном забое и ее обоснование по пылевому фактору // Сооружение горных выработок. — М.: МГИ, 1974. — № 7. — с. 119-122.
77. Карпухин В.Д. Применение антиокислителей с целью снижения температур рудничного воздуха.
78. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. — Издание 2-е, доп. — М.: Высшая школа, 1985. — 480 с.
79. Костеренко В.Н. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции горных выработок угольных шахт: Автореф. дисс. канд. техн. наук. — 2011.
80. Кочнев К.В. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха. — Изд. АН УССР. — 1962.
81. Крамаров А.С., Венгеров И.Р., Морева А.Г. К вопросу определения коэффициента нестационарного теплообмена при теплоизоляции стенок горных выработок // Охлаждение воздуха в угольных шахтах: выпуск 4. Сборник научных трудов. — Макеевка-Донбасс: Изд-во МакНИИ, 1975. — с. 46-51.
82. Красноштейн А.Е. Математическое моделирование процессов теплообмена рудничного воздуха с массивом горных пород при пожаре / Красноштейн А.Е., Казаков Б.П., Шалимов А.В. / ФТПРПИ, №3. — 2006, с. 94-102.
83. Красноштейн А.Е. Моделирование нестационарных процессов распространения газовых примесей по выработкам рудника в условиях рециркуляционного проветривания / Красноштейн А.Е., Казаков Б.П., Шалимов А.В. / ФТПРПИ, №1. — 2006, с. 95-101.
84. Красноштейн А.Е. Моделирование процессов нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов

- // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых — Новосибирск. — 2007, № 5. — с. 77-85.
85. Красноштейн А.Е. Файнбург Г.З. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников. — Екатеринбург: Типография изд-ва «Уральский рабочий», 1992. — 243 с.
 86. Краснощеков Л.Ф. Расчет и проектирование воздухонагревательных установок для систем приточной вентиляции. — Л.: Стройиздат, 1972. — 87 с.
 87. Круглов Ю.В. Моделирование систем оптимального управления воздухораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников: дисс. канд. тех. наук. — Пермь: 2006.
 88. Круглов Ю.В. Научно-технические основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников// Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодной научной сессии ГИ УрО РАН — Пермь, 2011. — с. 100-102.
 89. Кузин В.А., Величко А.Е., Хохотва Н.Н. и др. Единая методика прогнозирования температурных условий в угольных шахтах. — Макеевка-Донбасс: Изд-во МакНИИ, 1979. — 196 с.
 90. Курилко А.С. Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства горных пород. — Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. — 154 с.
 91. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Том VI. Гидродинамика. — 3-е изд., перераб. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 736 с.
 92. Лапшин А.А. Использование шахтных вод для форсуночного охлаждения рудничного воздуха // Горный вестник. — Изд-во Криворожского национального университета, 2013. — с. 206-211.
 93. Левин Л.Ю. Исследование динамики воздушных потоков вентиляционных сетей и разработка безопасных, энергосберегающих систем вентиляции рудников// Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов, выпуск 9 — Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. — 282 с.
 94. Левин Л.Ю. Исследование и разработка ресурсосберегающих систем воздухоподготовки для рудников: дис. ... канд. техн. наук. — Пермь: 2004. — 143 с.

95. Левин Л.Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки шахт и рудников: дисс... докт. техн. наук. — Пермь: 2010. — 274 с.
96. Левин Л.Ю. Нормализация микроклиматических условий горных выработок при отработке глубокозалегающих запасов калийных рудников // Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев, С.В. Бутаков, М.А. Семин // Горный журнал. — Москва, 2018. — № 8. — С. 97-102.
97. Литвинский Г.Г. Монолитная оболочка выработки из разгруженных и упрочненных пород. — Шахтное строительство, 1981, № 12, с. 17-20.
98. Луговский С.И. Проветривание глубоких рудников. — Госгортехиздат, 1962. — 324 с.
99. Лужецкая Н.Д. Исследование микроклимата и уточнение методики его расчета для условий калийных рудников (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): дисс... канд. техн. наук. — Пермь, 1974. — 276 с.
100. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.
101. Малахов Г. М., Черноус А. П. Вскрытие и разработка рудных месторождений на больших глубинах. — Госгортехиздат, 1962.
102. Мартынов А.А. Системы и средства локального охлаждения рудничного воздуха в горных выработках / А.А. Мартынов, А.К. Яковенко, А.Б. Олексюк // Горный информационно-аналитический бюллетень, №7 — М.: МГГУ, 2007. — с. 132-140.
103. Мартынов А.А. Тепловые расчеты и выбор средств охлаждения для регулирования микроклимата в тупиковых выработках глубоких шахт / А.А. Мартынов, Н.В. Малеев, А.К. Яковенко // Розробка родовищ 2013; щорічний науково-технічний збірник. — Д.: ТОВ «ЛізуновПрес», 2013. — С. 121 — 130.
104. Мартынов А.А., Лунев С.Г., Яковенко А.К. Прогнозирование и разработка комплекса мер по нормализации тепловых условий в горных выработках глубоких угольных шахт на ПЭВМ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М.: МГГУ, 2003.
105. Мартынов А.А., Яковенко А.К., Олексюк А.Б. Системы и средства локального охлаждения рудничного воздуха в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень, №7 — М.: МГГУ, 2007. — с. 132-140.
106. Материалы Семинара по горной теплотехнике, выпуск 5. /Сборник научн. работ. — Киев: Изд-во Института технической информации, 1964. — 183 с.

107. Медведев Б.И. Регулирование тепловых условий в лавах путем распределенной подачи охлажденного воздуха. Труды семинара по горной теплотехнике, выпуск 2. — Изд-во АН УССР, 1950.
108. Медведев Б.И. Тепловые основы вентиляции шахт при нормальных и аварийных режимах проветривания. — Киев-Донецк: Высшая школа, 1978. — 156 с.
109. Медведев Б.И., Гущин А.М., Лобов В.Л. Естественная тяга глубоких шахт. — М.: Недра, 1985. — 77 с.
110. Медведев Б.И., Почтаренко Н.С., Павловский В.А. Тепловые расчёты горных выработок в условиях рудничных пожаров на ЭЦВМ. — В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых. / Респ. межвед. научно-техн. сборник, выпуск 34. — Киев: Техніка, 1973. — с. 103-108.
111. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников. — Свердловск, УрО АН СССР, 1990. — С. 252.
112. Медведев И.И. Проветривание калийных рудников. — М.: Недра., 1970. — 207 с.
113. Минин В.Е. Воздухонагреватели для систем вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Стройиздат, 1976 г. — 199 с.
114. Мохирев Н.Н. Расчет параметров микроклимата с учетом конденсации влаги в рудничной вентиляционной сети / Н.Н. Мохирев, О.И. Дударь, Е.С. Дударь // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М.: Изд-во Горная книга. — 2011, №5. — с. 331-344.
115. НПАОП 10.0-1.01-10. Правила безпеки у вугільних шахтах. — Киев: Державний комітет України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду, 2010. — 430 с.
116. Ониани Ш.И., Николаишвили Н.С. Охлажденная зона горного массива вокруг выработки при постоянной температуре рудничного воздуха. — Уголь Украины, 1976, № 11, с. 21-23.
117. Откидач В.В. Исследование температурных полей горных пород в условиях высокотемпературного режима вентиляции (пожар) при подземной разработке угольных пластов.: автореф. дис. к.т.н. — Днепропетровск: ДГИ, 1976. — 19 с.
118. Отопление и вентиляция: Учебник для вузов. В 2-х частях. Ч.2. Вентиляция. Под ред. В.Н. Богословского. — М.: Стройиздат, 1976. — 439 с.
119. Палеев Д.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов // Горная промышленность. — М.: Научно-производственная компания «Гемос Лимитед». — 2007. — № 6. — с. 20-23.

120. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Перевод с английского. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
121. Патент № 2587192 Российская Федерация. Способ мониторинга расходов воздуха в сети горных выработок и система для его осуществления / Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Мальков П.С., Кормщиков Д.С.; заявитель и патентообладатель ГИ УрО РАН. — № 2014147769/03; заявл. 26.11.14; опубл. 20.06.16, Бюллетень № 17. — 3 с.
122. Патент № 2509895 Российская Федерация. Способ кондиционирования воздуха и охлаждения технологических сред оборудования при добыче полезных ископаемых подземным способом / Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Ковалев А.В.; заявитель и патентообладатель ГИ УрО РАН. — № 2015125884/03; заявл. 29.06.15; опубл. 20.12.16, Бюллетень № 35. — 2 с.
123. Патент № 2611770 Российская Федерация. Способ кондиционирования воздуха в горных выработках / Левин Л.Ю., Зайцев А.В.; заявитель и патентообладатель Левин Лев Юрьевич, Зайцев Артем Вячеславович. — № 2015125852; заявл. 29.06.15; опубл. 01.03.17, Бюллетень № 7. — 2 с.
124. Пивняк Г.Г., Бойко В.А. Пути решения проблемы нормализации тепловых условий в горных выработках глубоких шахт Донбасса // Горный журнал, №8 — Санкт-Петербург, 2012. — с. 15-18.
125. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. — М.: Энергия, 1970. — 416 с.
126. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых // Приказ Ростехнадзора № 599 от 11.12.2013. — 2014 г.
127. Правила безопасности в угольных шахтах // Приказ Ростехнадзора № 550 от 19.11.2013. — 2014 г.
128. Правила безопасности при разработке нефтяных месторождений шахтным способом // Приказ Ростехнадзора № 501 от 28.11.2016. — 1987.
129. Проблемы горной теплофизики: Тезисы выступлений Всесоюзной научно-технической конференции, посвященной 200-летию Ленинградского горного института /под редакцией Ю.Д. Дядькина. — Изд-во ЛГИ, 1973. — 92 с.
130. Пучков Л.А., Бахвалов Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт. — М.: Недра, 1992.
131. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1984. — 359 с.

132. Руководство по применению установок кондиционирования воздуха в глубоких шахтах. — Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1980. — 297 с.
133. Руководство по проектированию вентиляции шахт. — М.: Недра, 1975.
134. Санитарные нормы и правила "Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях" утверждены Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 30 апреля 2013 г. № 33.
135. СанПиН 2.2.4.548-96. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы // Утверждены постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ № 21 от 01.10.1996 г. — Москва, 1997.
136. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Гигиенические требования к микроклимату при проектировании и эксплуатации калийных рудников», утверждены Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 5 от 13.01.2009.
137. Саранчук В.И., Баев Х.А. Теоретические основы самовозгорания угля. — М.: Недра, 1976. — 245 с.
138. Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* утв. Приказом Минрегион России от 30.06.2012 № 275, 2013 — 154 с.
139. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «Аналитический комплекс «АэроСеть»: № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН. — № 2015610589; заявл. 24.04.14; дата регистрации 14.01.15. — 1 с.
140. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. — М.: Углетехиздат, 1949. — 443 с.
141. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Том 4. Изд. 6-е. — М.: Наука, 1981. — 551 с.
142. Смирнов Ю.М. Управление тепловым режимом тупиковых выработок глубоких рудников Норильска: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, 1998. — 21 с.
143. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. — М.: Изд. стандартов., 1999. — 67 с.

144. Совершенствование ресурсосберегающих систем вентиляции рудников Верхнекамского месторождения калийных солей/ Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, Ю.В. Круглов, А.Г. Исаевич, А.В. Шалимов// Горный журнал, №8, 2010. — с. 81-83.
145. Современные методы и средства противоаварийной защиты шахт. /Сборник научных трудов. — Донецк: ВНИИГД, 1983. — 119 с.
146. Соловьев Д.Е. Прогноз теплового режима рудника с учетом динамики развития горных работ / Д.Е. Соловьев, Ю.А. Хохолов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М.: Изд-во Горная книга. — 2009, № 5. — с. 270-275.
147. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*.
148. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. — С-Пб.: Издательство «АВОК Северо-Запад», 2005. — 400 с.
149. Стукало В.А. Новый метод теплового расчёта выработок глубоких шахт. — В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых. /Респ. межвед. научно-техн. сб-к, вып. 62. — Киев: Техніка, 1982, с. 87-94.
150. Стукало В.А., Гущин А.П. Нестационарный теплообмен между породами и рудничным воздухом при граничных условиях третьего рода, осложненных влагообменом. — Известия ВУЗов. Горный журнал, 1984, № 12, с. 43-48.
151. Сучков А.Н. Исследование целесообразности теплоизоляции стенок горных выработок в глубоких шахтах Донбасса: автореф. дис. ... к.т.н. — Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1981. — 20 с.
152. Тепловое взаимодействие породных и закладочных массивов при отработке кимберлитов / А.С. Курилко, Ю.А. Хохолов, Е.К. Романова, Б.Н. Заровняев, А.Н. Петров // Проблемы и пути эффективной отработки алмазонасных месторождений. — 2011. — с. 211-214.
153. Тепловой режим угольных шахт Якутии и способы его регулирования / Васильев П.Н., Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Шерстов В.А. — Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009. — 240 с.
154. Технологические схемы комплекса установок кондиционирования воздуха глубоких шахт. — Донецк: Донгипрошахт, 1987. — 96 с.
155. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И. Аэрология горных предприятий. — М.: Недра, 1987. — 421 с.

156. Файнбург Г.З. Методы математического моделирования процессов тепломассопереноса в вентиляционных сетях шахт и рудников // Разработка соляных месторождений. — Пермь, 1978. — с. 47-55.
157. Федеральный закон № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. (с изменениями и дополнениями от 25.03.2017 г.).
158. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Том 7. Физика сплошных сред. — М.: Мир, 1965. — 286 с.
159. Ферми Э. Термодинамика. — Ижевск: ИД «Удмуртский университет», 1988. — 163 с.
160. Хохолов Ю.А. Математическое моделирование процесса теплообмена в регенеративной системе кондиционирования рудничного воздуха// Термодинамика и теплообмен сложных систем: сб. науч. тр. — Якутск: Изд-во Якут. гос. ун-та, 1990. — с. 46-52.
161. Хохолов Ю.А. Численный расчет теплоаккумулирующих выработок, работающих в регенеративном режиме// Прогноз и регулирование теплового режима в горных выработках: сб. науч. тр. — Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1987. — с. 37-40.
162. Хохотва Н.Н., Яковенко А.К. Кондиционирование воздуха при строительстве глубоких шахт. — М.: Недра, 1985. — 184 с.
163. Цейтлин Ю.А. Проектирование и эксплуатация шахтных систем кондиционирования воздуха. — М.: «Недра», 1983. — 261 с.
164. Цейтлин Ю.А. Установки для кондиционирования воздуха в шахтах. М.: «Недра», 1974, с. 168.
165. Цой С.В. Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. Алма-Ата: Наука, 1975.
166. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. — М.: Высшая школа, 1973. — 446 с.
167. Чабан П.Д. Совершенствование комбинированных схем проветривания шахт, разрабатывающих многолетнемерзлые россыпи. — Колыма, 1986. — №6. — с. 4-7.
168. Черниченко В.К., Венгеров И.Р. Математическое моделирование кондуктивных противотепловых СИЗ горнорабочих. — В кн.: Улучшение тепловых условий труда в глубоких шахтах. /Тезисы докладов Всесоюзного научно-практического совещания — Донецк-Москва: Изд-во ЦНИЭИУголь, 1978, с. 49-50.
169. Чижов Б.Д. Нисходящее проветривание глубоких шахт Донбасса: дисс. ... канд. техн. наук, 1957.

170. Шалимов А.В. Разработка математической модели расчета поверхностных теплообменных аппаратов при различных схемах течения теплоносителя / А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Горное эхо. — Пермь, 2017. — № 3-4 (68-69). — С. 38-49.
171. Шточес Б., Черник Б. Вентиляция глубоких шахт. — ОНТИ Украины. — 1954.
172. Шувалов Ю.В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера: Ресурсосберегающие системы — Л.: Издательство Ленинградского университета, 1988. — 196 с.
173. Шувалов Ю.В., Галкин А.Ф. Теория и практика оптимального управления тепловым режимом подземных сооружений криолитозоны / Горный информационно-аналитический бюллетень. — М.: МГГУ, 2010, №8. — с. 365-370.
174. Шувалов Ю.В., Кузин В.А., Худяков А.Н. Опыт и совершенствование регулирования теплового режима шахт и рудников ФРГ. — М.: Изд-во ЦНТУ "Недра", 1990. — 51 с.
175. Щербань А.Н., Кремнев О.А. и др. Охлаждение и осушение воздуха в глубоких угольных шахтах. — АН УССР, 1956 г.
176. 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.
177. 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.
178. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Основы теории и методы тепловых расчетов рудничного воздуха. — Углетехиздат: 1953.
179. 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.
180. Щербань А.Н., Ягельский А.Н. Кондиционирование рудничного воздуха. — Углетехиздат, 1956.
181. Щербань А.Н., Ягельский А.Н., Баратов Э.И. Упрощенные способы тепловых расчетов рудничного воздуха в шахтах Донбасса. — Изд-во АН УССР, 1954.
182. Юсипук Ю.А. Альтернативные способы снижения температуры воздуха в глубоких шахтах и рудниках / Ю.А. Юсипук, Р.А. Фурман // Проблеми гірничої технології: матеріали регіональної наук.-практ. конф. — Красноармійськ: ДонНТУ, 2010. — с.165-168.

183. Ябко И.А. Нестационарное температурное поле вокруг выработки некругового сечения. — Аннотация депонированной рукописи / ИФЖ в ВИНТИ, № 1792-74 — М.: 1974. — 12 с.
184. Яворский В.А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных. — М.: Изд-во МФТИ. 2011 — 45 с.
185. Яковенко А.К. Охлаждение воздуха в лавах при сложных горно-геологических условиях отработки пластов / Яковенко А.К., Климов А.А., Плаксиенко О.В., Васильева Н.А., Маслова М.Ю. // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. — 1 (25). — 2010. — с. 105-111.
186. Яковенко А.К., Аверин Г.В. К вопросу расчета мощности средств холодоснабжения лав с охлаждающими элементами забойного оборудования. — В кн.: Охлаждение воздуха, борьба с пылью и выбросами в угольных шахтах. /Сб-к научн. трудов. — Макеевка-Донбасс: Изд-во МакНИИ, 1982, с. 13-17.
187. Яковенко А.К., Хохотва Н.Н., Аверин Г.В. К вопросу аналитического исследования равномерно-рассредоточенного охлаждения воздуха в лавах с учётом тепло-массообмена. — В кн.: Вопросы вентиляции, охлаждения воздуха, борьбы с пылью и контроль рудничной атмосферы в шахтах. /Сборник научн. трудов. — Макеевка-Донбасс: Изд-во МакНИИ, 1981, с. 29-33.
188. Andrew O.E. Ventilation of Lake Shore mines // Mining in Canada. Northern Mines Press LTD. — 1957. — 38 p.
189. Barenbrug A. W. Deep Level Mining. Observations on the Kolar Field. The South African Mining and Engineering Journal, 1948. N 2886.
190. Batzel S. The determination of thermal values in mines and their utilization for the mathematical solution of climatic problems. Bergbau Archiv., 13. — 1952.
191. Bromilov I.G. Ventilation of deep coal mines. Iron and Coal Trades Review, vol. CLXX, NN 4531-33. — 1955.
192. Caw J. M. The Colar Gold Field. Mine and Quarry Engineering. 1956. Vol. 22 №7. pp. 238-296.
193. Caw J. M. The estimation of ventilation air temperatures in deep mines. Journal Chem. Met. And Min. Society of South Africa. Vol. 51, №3. — 1950.
194. D.J. Brake. Mine ventilation // A Practitioner's manual. — Mine Ventilation Australia: Brisbane. — 2012. — 686 p.

195. D.J. Brake. The Deep Body Core Temperatures, Physical Fatigue and Fluid Status of Thermally Stressed Workers and the Development of Thermal Work Limit as an Index of Heat Stress. — Curtin University. — 2002.
196. Development of a code of practice for work in hot and humid conditions in coal mines. — Institute of Occupational Medicine, Edinburgh. —1997.
197. Dietterle H.B. Neue Untersuchungsergebnisse auf dem Gebiet die Grubenklimas im Kalibergbau. Neue Hutte Zeitschrift fur das Berg — und Huttenwesen. Leipzig, Nov. 1961, Hall 11.
198. Fritzsche H. Heutiger Stand und Zukunftsmoglichkeiten der Wetterkuhlung in heissen Gruben. Gluckauf, 76. — 1940.
199. Funnel R.C., Bluhm S.J. Sheer T.J. Optimization of Cooling Resources in Deep Stopes// Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress. — Poland, 2001. — pp. 391-398.
200. Gibson K.L. The computer simulation of climatic conditions in underground mines. Ph. D. Thesis. — University of Nottingham, 1976.
201. Hall A.E. The use of controlled recirculation to conserve energy//Mine Vent. Proc. 2-nd US Mine Symp., Boston — 1985. — p. 207-215.
202. Hinsley F.B., Morris W.I. Removal of moisture and heat from a Hotts Mine by ventilation. Iron and Coal, X. — 1950.
203. Houberechts A. Air conditioning in Belgium. Colliery Engineering, VIII — 1952.
204. Jansen F. Die Erwarmung der Wetter in tieften Steinkohlengruben und die Moglichkeiten einer Erhonung der Kaltenwirkung des Wetterstromes. Gluckauf, 63. — 1927.
205. Jeppe C.W. The estimation of ventilation air temperature in deep mines. Journal Chem. Met. Min. Soc. of South Africa. Vol. 40, №1, 1939.
206. Kazakov B.P., Shalimov A.V. The connected task of non-stationary heat exchange between mine air and mining massif // Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress (Poland), — 2001.
207. Kertikov V. Influence of relative variations along mine workings on air-flow temperature // Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress. — Poland: Research & Development Center for Electrical Engineering and Automation. — 2001. — p. 85-90.
208. Klima-Bergverordnung — KlimaBergV, Verlag Glückauf GmbH, Essen, Germany, No. 420-7. (Central publisher for German mine regulations).

209. Lamberechts J. The estimation of ventilation air temperatures in deep mines. *Journal Chem. Met. And Min. Society of South Africa*. Vol. 51, №8. — 1950.
210. Lawton B.R. Local cooling underground by recirculation // *Transaction of the Inst. Of Mining Engineers*. —1993. —Vol. 90, May. — p. 63-68
211. Mackay L., Bluhm S., 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.
212. McPherson M. J. Refrigeration in South African Gold Mines// *Mining Engineer* (Feb.), 1976.
213. McPherson M. J. The analysis and simulation of heat flow into undergrounds airways// *International Journal of Mining and Geological Engineering*, Vol. 4, pp. 165-196.
214. McPherson M.J. *Subsurface ventilation and Environmental Engineering*, 1993.
215. McPherson M.J. *Subsurface ventilation and Environmental engineering*. — Chapman & Hall. — 2009. — 824 p.
216. McPherson M.J. *Subsurface ventilation engineering*, 2007.
217. McPherson, M.J. (1975). The simulation of airflow and temperature in the stopes of S. African gold mines. *Proc. 1st Int. Mine Vent. Congress. Johannesburg* pp. 35-51.
218. *Mining Methods at the Cam and Motor*. *The Mining Journal*, 1957, vol. 249, № 6378.
219. Morris I.N., Walker G. Changes in the approach to ventilation in recent years // *The Mining Eng.* — 1982. —Vol. 141, № 244. — p. 401-413.
220. Nowak B., Filek K., Nawrat S., Roszkowski J. The effect of the Velocity of Air Flowing Through an Intermediary Membrane Cooler on its Thermal Power// *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*. — Poland, 2001. — pp. 363-370.
221. *Occupational exposure to hot environments*. — Revised Criteria, NIOSH. — 1986.
222. R. Brake. *A new generation of health and Safety Protocols for working in heat*. — MAUSIMM. — 2013.
223. Ramsden R., Sheer T.J., Butterworth M.D. *Design and Simulation of Ultra-Deep Mine Cooling Systems*// *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*. — Poland, 2001. — pp. 755-760.
224. Rawlins C.A., Phillips H.R. *Mine Cooling Strategies and Insulation of Chilled Water Pipes*// *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*. — Poland, 2001. — pp. 371-380.
225. Rawlins C.A., Phillips H.R. *Reduction of Mine Heat Loads*// *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*. — Poland, 2001. — pp. 381-390.

226. Recirculation of air in the ventilation and cooling of deep gold mines / Burton R.C., Plenderleight W., Stewart J.M., Pretorius B.C., Holding W. // Mine ventilation: 3-d Int. Congress, Harrogate, England. — 1984. — p. 291-299
227. Rutherford J. G. Ventilation heat Exchanger at Inco's Greighton Mine. Canadian Mining Journal, 1958, vol. 79, №10, pp. 97-100.
228. Schlotte W. Air Conditioning in German Mines// Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress. — Poland, 2001. — pp. 733-738.
229. Sheer T.J., Butterworth M.D., Ramsden R., Ice as Coolant for Deep Mines// Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress. — Poland, 2001. — pp. 355-362.
230. Waclawik J. Równania mechaniki płynów i termodynamiki dla skalnego osrodka porowntego z punktu widzenia prognozy Warunkow klimatycznych. /Mat. conf. z I Posiedzenia Grupy Roboczej Nr. 1 (Katowice, 1980), – Katowice Główny Instytut Gornictwa. — 1981, s. 526-537.
231. Wiles G.G. Theory underlying temperatures in horizontal airways. Journal Chem. Met. And Min. Society of South Africa. Vol. 54, №6. — 1954.