

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

На правах рукописи



Бородавкин Дмитрий Алексеевич

**РАСЧЕТ И УПРАВЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ  
РАБОЧИХ ЗОН ДЛИННЫХ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ  
(НА ПРИМЕРЕ СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ)**

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук  
Зайцев Артем Вячеславович

Пермь 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В РАБОЧИХ ЗОНАХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ .....	11
1.1 Анализ параметров, определяющих тепловой режим горных выработок	12
1.2 Состояние микроклимата рабочих мест рудника 4 РУ Старобинского месторождения ОАО «Беларуськалий».....	17
1.3 Нормирование микроклимата в Российской Федерации и Республике Беларусь .....	19
1.4 Анализ методов прогнозирования температурных условий .....	24
1.5 Способы борьбы с нагревающим микроклиматом.....	28
1.5.1 Организационные мероприятия .....	31
1.5.2 Горнотехнические мероприятия .....	36
1.5.3 Теплотехнические мероприятия .....	37
1.6 Цель и задачи исследования .....	40
2 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В ДЛИННОМ ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ .....	41
2.1 Исследования величины тепловыделений от конвейера .....	43
2.2 Экспериментальные исследования величины нагрева при работающем конвейере.....	43
2.3 Математическая модель изменения температуры воздуха при его движении по конвейерному штреку .....	45
2.3.1 Оптимизация распределения заданного расхода воздуха, подаваемого по конвейерному и транспортному штрекам по критерию минимизации температуры воздуха .....	50
2.4 Исследования величины тепловыделений от энергопоезда .....	52
2.4.1 Экспериментальные исследования величины нагрева и охлаждения воздуха при разных режимах работы энергопоезда .....	53
2.4.2 Математическая модель конвективного переноса теплоты в лаве с учетом теплообмена с окружающими источниками .....	59
2.5 Выводы по главе .....	61
3 ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЛИННЫХ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ .....	63
3.1 Экспериментальные исследования распределения параметров микроклимата в длинном очистном забое с учетом нестационарных источников тепловыделений .....	63
3.2 Разработка динамической модели тепломассообменных процессов в длинных очистных забоях.....	69
3.2.1 Постановка модели.....	70
3.2.2 Параметризация модели.....	73
3.2.3 Верификация разработанной математической модели.....	77

3.3	Результаты моделирования.....	84
3.4	Выводы по главе .....	86
4	РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ.....	87
4.1	Обоснование критерия для управления тепловым режимом .....	87
4.2	Расчет распределения температуры в длинном очистном забое .....	94
4.3	Алгоритм комплексирования организационных и технических мероприятий.....	100
4.4	Мероприятия по нормализации микроклимата .....	106
4.4.1	Регламентированный режим работы и отдыха.....	106
4.4.2	Ротация рабочих .....	111
4.4.3	Применение системы кондиционирования воздуха.....	112
4.5	Разработка прибора для контроля микроклиматических и физиологических параметров .....	118
4.6	Выводы по главе .....	120
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	122
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	123

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы диссертации

Развитие горнодобывающей отрасли на современном этапе обуславливает необходимость освоения глубокозалегающих горизонтов. Увеличение глубины ведения работ сопровождается повышением температуры породного массива и сокращением числа вскрываемых горных выработок. Это приводит к снижению объемов воздуха, подаваемого на проветривание и усилению влияния техногенных источников тепловыделения на формирование неблагоприятных микроклиматических условий в горных выработках. Работа в условиях высоких температур затрудняет процесс отвода тепла от функционирующего электрического оборудования, что приводит к аварийным остановкам оборудования вследствие перегрева, ухудшению свойств смазочных материалов и снижению срока службы оборудования по причине преждевременного износа деталей. При сочетаниях высокой влажности и температуры воздуха увеличивается коррозия оборудования.

Помимо этого, высокие температуры в подземных условиях могут вызвать тепловой стресс у работников. Это состояние характеризуется утомлением, потерей жидкости и повышенным психофизиологическим дискомфортом, что негативно влияет на способность концентрироваться и принимать решения. Снижение концентрации способно привести к увеличению числа ошибок и несчастных случаев, особенно при выполнении сложных и опасных задач. В результате этого на производстве также повышается риск аварий.

При разработке мероприятий, направленных на снижение влияния неблагоприятных параметров микроклимата на безопасность ведения процессов, важным является понимание процессов и механизмов формирования теплового режима, а также возможность его прогнозирования.

Исследованием теплового режима рудников занимались многие отечественные ученые-теплофизики. Основополагающими являются труды Ю.Д. Дядькина, А.Ф. Воропаева, О.А. Кремнева, А.Н. Щербаня, С.Г. Гендлера, Ю.В. Шувалова, Б.И. Медведева, В.Я. Журавленко, А.Н. Андрущенко, Б.П. Казакова, А.В. Зайцева. Среди зарубежных коллег данным вопросом занимались M.J. McPherson, R. Brake, S.J. Bluhm, K.L. Gibson, L. Maskay, A.B. Heydarabadi, A.M. Donoghue, но в работах авторов не в полной мере учтена специфика формирования микроклимата в рабочих зонах шахт и рудников.

Анализ факторов, формирующих микроклимат шахт и рудников, показал, что в итоговое уравнение теплового баланса наибольшее значение вносит теплообмен

породного массива с шахтным воздухом, а также работа тепловыделяющего оборудования.

На сегодняшний день исследования теплообменных процессов в подземных выработках осуществляются, как правило, с использованием математических моделей тепло-, влаго- и воздухораспределения в рудничной вентиляционной сети. Существующие модели способны рассматривать техногенные источники тепловыделений (горные машины и оборудование) только в режимах «работы» и «останова». При этом для первого режима тепловыделения принимаются постоянными, а в случае второго режима — тождественно равными нулю. Таким образом, данные модели, фактически, описывают стационарные аэрологические процессы в системе горных выработок.

В действительности горное оборудование обладает конечной теплоемкостью и при работе испытывает нагрев (как и окружающий массив). После его отключения происходят продолжительные тепловыделения от нагретых тел, уменьшающиеся с течением времени от максимальных значений, соответствующих штатному режиму работы, вплоть до нуля (при условии достаточно длительной остановки). Другими словами, оборудованию свойственна тепловая инерция. Ее учет важен для корректного моделирования аэрологических процессов в рудничных вентиляционных сетях.

Данная работа посвящена разработке корректной модели теплообменных процессов в горных выработках, способной учитывать нестационарную природу техногенных источников тепловыделений в длинных очистных забоях калийных рудников. Анализ результатов моделирования позволит разрабатывать мероприятия, направленные на эффективное управление тепловым режимом подземных рабочих зон.

### **Цель работы**

Обеспечение безопасного ведения горных работ в условиях высоких температур воздуха длинных очистных забоев с учетом распределения микроклиматических параметров воздуха и режимов работы оборудования.

### **Основная идея работы**

Обоснование технических и организационных мероприятий по управлению тепловой нагрузкой среды в условиях высоких температур воздуха на основании математического моделирования распределения микроклиматических параметров рудничной атмосферы в пространстве и времени с учетом нестационарного характера тепловыделений от техногенных источников тепловыделения.

### **Основные задачи работы**

1. Теоретические и экспериментальные исследования характера тепловыделений от оборудования подготовительных и очистных выработок калийных рудников.
2. Разработка математических моделей, описывающих нестационарный характер нагрева и охлаждения оборудования в горных выработках.
3. Проведение экспериментальных исследований динамики распределения микроклиматических параметров воздуха в длинных очистных забоях калийных рудников и в сопряженных с ними выработках.
4. Исследование особенностей формирования микроклиматических условий в добычные и ремонтные смены.
5. Разработка динамической модели распределения микроклиматических параметров в длинных очистных забоях с учетом нестационарной работы источников тепловыделения.
6. Разработка методического подхода к комплексированию организационных и технических мероприятий по управлению тепловым режимом подземных рабочих зон.

**Методы исследований** предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования формирования микроклимата в длинных очистных забоях, статистическую обработку результатов экспериментов, математическое моделирование распределения микроклиматических параметров, анализ результатов численных экспериментов.

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

- Зависимости мощности тепловыделений от конвейерных линий и оборудования энергопоезда лав, учитывающие нестационарный и асимметричный характер нагрева и охлаждения оборудования, позволяют осуществлять расчет влияния техногенных источников тепловыделения на нагрев воздушных потоков в горных выработках.
- Математическая модель временной и пространственной динамики микроклимата длинного очистного забоя и подготовительных выработок, учитывающая в сопряженной постановке нестационарный характер техногенных источников тепловыделения и теплообмен с породным массивом, дает возможность рассчитывать интегральную тепловую нагрузку среды на организм горнорабочих с учетом графика их нахождения на различных участках.

- Комплексование технических и организационных мероприятий на основе нестационарной пространственно-временной динамики микроклимата в пределах рабочей зоны и времени пребывания рабочих обеспечивает решение задачи управления тепловым режимом рабочих зон.

**Научная новизна:**

- Получены аппроксимирующие кривые, описывающие процессы нагрева и охлаждения воздуха при разных режимах работы тепловыделяющего оборудования с учетом их взаимодействия с массивом горных пород.
- Разработана модель сопряженного нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород с учетом работы режимов работы протяженных источников тепловыделений.
- Обоснован способ распределения воздуха между транспортными и конвейерными штреками, при котором достигается минимальная температура смешанного воздуха и не происходит аварийной остановки электрооборудования в следствие перегрева.
- Создана динамическая модель распределения микроклиматических параметров в длинных очистных забоях, учитывающая нестационарную работу источников тепловыделения и позволяющая оценить меняющееся во времени воздействие неблагоприятных параметров микроклимата на горнорабочих.
- Предложен алгоритм комплексирования технических и организационных мероприятий, основанный на минимизации интегрального индекса тепловой нагрузки среды.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натуральных измерений, большим объемом экспериментальных исследований в шахтных и лабораторных условиях, положительными результатами реализации предложенных решений на рудниках ОАО «Беларуськалий» и ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий».

В работе использован комплексный метод исследований, включающий обобщение и научный анализ данных литературных источников по методам расчета и способам нормализации теплового режима рудников, натурные эксперименты в области формирования микроклимата горных выработок и оценки степени влияния микроклиматических параметров на здоровье горнорабочих.

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

Полученные в диссертационной работе результаты позволяют осуществлять выбор организационных и технических мероприятий, обеспечивающих эффективное управление тепловым режимом в подготовительных и очистных забоях рудников при ведении работ в условиях нагревающего микроклимата при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.

На сегодняшний день многие полученные результаты уже используются на горнодобывающих предприятиях, часть находится в процессе внедрения.

Описанные в работе принципы учета тепловыделений от нестационарных источников тепловыделений позволили разработать математическую модель для оценки микроклиматических условий и тепловой нагрузки среды для подземной группы рабочих ОАО «Беларуськалий» в зависимости от горнотехнических условий ведения горных работ. На основании результатов работы разработано программное обеспечение «ТНС», функциональные возможности которого позволяют вывести на качественно новый уровень расчет микроклиматических параметров воздуха в рабочих зонах подготовительных и очистных забоев, с учетом меняющихся в пространстве и времени неблагоприятных параметров микроклимата.

Разработанные решения использованы в качестве исходных данных при технико-экономической оценке необходимости и целесообразности развития систем кондиционирования воздуха на основе глубины залегания, фактических температур воздуха в рабочих зонах и температуры горных работ на рудниках ОАО «Беларуськалий».

На основании предлагаемых подходов к нормированию микроклимата разработано Обоснование промышленной безопасности опасного производственного объекта для рудника Гремячинского ГОК ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий» в части обеспечения безопасных условий труда по тепловому фактору. Документ прошел экспертизу промышленной безопасности и внесен в реестр Ростехнадзора.

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

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук в рамках проекта «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими, геомеханическими и аэрологическими процессами при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (рег. номер ЦИТИС 122012000396-6). Также исследования, включенные в



диссертационную работу, осуществлялись при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30008).

### **Апробация работы**

Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях «ГИ УрО РАН» «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (Пермь, «ГИ УрО РАН», 2018 — 2019 гг., 2023 г.), на международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2019 г., 2023 г.), на Всероссийских молодежных форумах «Нефтегазовое и горное дело» (Пермь, ПНИПУ, 2018 г., 2022 г.), на международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятия минерально-сырьевого комплекса в XXI веке (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2018 г.), на Всероссийской научной конференции «Промышленная безопасность и охрана труда» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2023 г.), на XVIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2024 г.), на научно-технических советах рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», руднике Гремячинского ГОК и управлении ООО «ЕвроХим», рудниках и управлении ОАО «Беларуськалий» в 2020-2024 годах.

### **Личный вклад автора**

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

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д-ру техн. наук Зайцеву А.В. за формирование научного направления работы, консультации при выполнении работы и за создание уникальной среды для исследований, чл.-корр. РАН Левину Л.Ю., д-рам техн. наук Шалимову А.В., Семину М.А. за ценные указания и помощь в разработке математических моделей. Успешной работе над диссертацией способствовала творческая, доброжелательная атмосфера в коллективе и поддержка коллег.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе 7 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве

образования и науки Российской Федерации, из них 5 в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Получено 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

### **Объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и 23 таблицы. Список использованных источников состоит из 136 наименований, в том числе 32 зарубежных.

## **1 ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В РАБОЧИХ ЗОНАХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ**

Современными горнодобывающими предприятиями, с целью поддержания и увеличения мощности добычи вовлекаются в отработку новые глубокозалегающие и труднодоступные залежи. При увеличении глубины отработки возрастает температура породного массива и снижается количество вскрывающих горных выработок, что приводит к невозможности подачи больших объемов воздуха, в результате чего температура воздуха в горных выработках повышается до сверхнормативных величин, регламентируемых ФНиП «Правила безопасности ...» [66].

Влияние неблагоприятных параметров микроклимата приводит к ухудшению здоровья, а также снижению производительности труда из-за излишней нагрузки на различные функциональные системы организма человека [35], этот процесс усугубляется за счёт воздействия на организм таких производственных факторов, как шум, вибрация, пыль и другие [88]. Рабочие места с высокой относительной влажностью воздуха создают особый риск, по причине нарушения естественного процесса охлаждения организма испарением пота с поверхности тела.

Работа в оптимальных и допустимых условиях обеспечивает нормальное функционирование механизмов терморегуляции организма и поддержания температуры тела в пределах  $+37^{\circ}\text{C}$  [3]. Это достигается благодаря увеличению циркуляции крови в области кожных покровов и, как следствие, стимулированию процесса теплоотдачи за счет потоотделения, который, сопровождается охлаждением кожи и крови путем испарения влаги. Сочетание высокой температуры и относительной влажности воздуха снижает эффективность отвода тепла, вследствие чего тепло начинает накапливаться в организме, что приводит к постепенному повышению температуры тела [8]. Это выражается в виде различных физиологических симптомов.

К первоначальным симптомам относятся:

- снижение заинтересованности к выполнению рабочих операций;
- снижение концентрации внимания;
- желание найти более комфортные условия, сопровождающееся раздражительностью.

На начальных этапах это способно приводить к ухудшению двигательных функций. Хэнкок в работе Килблока и Шутте [118] заметил, что тепловой стресс ухудшает умственную работоспособность задолго до любого снижения физической работоспособности. В свою очередь, было высказано предположение, что увеличение

тепловой нагрузки приводит к снижению производительности и увеличению частоты аварий.

Эти наблюдения подтверждаются Мисаки и др. [129], которые выделили в качестве свойств, наиболее подверженных негативному влиянию тепловой нагрузки, ловкость и координацию, способность наблюдать нестандартные, слабые оптические знаки, способность оставаться бдительным при выполнении длительных и монотонных задач и способность принимать быстрые решения. Общая безопасность может также оказаться под угрозой последствий неблагоприятного воздействия, таких явлений, как раздражение, гнев и другие эмоции, поскольку они могут привести к необдуманным действиям работников в опасных ситуациях.

Помимо этого, игнорирование первоначальных симптомов способно привести к потере координации, а также к развитию более серьезных последствий для организма, среди которых тепловая сыпь, перегрев (обморок), тепловое истощение, тепловой удар и в крайних случаях – смерть.

Часто, особенно при использовании специальной одежды, затрудняющей теплообмен между организмом и окружающей средой, у работников наблюдаются такие заболевания как тепловой коллапс и тепловой удар. Работники, чья работа связана с высокой тепловой и физической нагрузкой, подвержены ускоренному процессу старения организма, а также увеличению риска развития сердечно-сосудистых заболеваний, и как следствие возможным смертельным исходам [3, 35, 110].

Помимо этого, высокие температуры воздуха могут приводить к аварийному отключению оборудования вследствие перегрева, что в свою очередь влияет как на производительность рудников, так и на общий уровень безопасности.

### **1.1 Анализ параметров, определяющих тепловой режим горных выработок**

К факторам, влияющим на формирование микроклиматических условий в рудничной атмосфере, относятся: [26]:

- температура породного массива;
- адиабатическое сжатие/расширение воздуха при его движении по вертикальным и наклонным выработкам;
- тепловыделения от техногенных источников тепла;
- теплообменные процессы между массивом горных пород и рудничным воздухом;
- теплообменные процессы между добытым полезным ископаемым и рудничным воздухом;

- тепловыделения от шахтных вод;
- тепловыделения от работников.

### **Адиабатическое сжатие воздуха**

При движении воздуха по вертикальным и наклонным выработкам происходит изменение теплосодержания воздуха вследствие его адиабатического сжатия [21].

$$\frac{T_2}{T_1} = (P_2 - P_1)^{\gamma-1}, \quad (1.1)$$

где  $T$  — температура воздуха по сухому термометру (°C);  $P$  — давление воздуха (Па);  $\gamma$  — отношение удельных теплопотерь воздуха при постоянных объеме и давлении; 1, 2 — обозначают начальные и конечные условия соответственно.

Увеличение температуры воздуха является результатом преобразования потенциальной энергии в тепловую при движении по наклонным/вертикальным выработкам сверху-вниз. При движении воздуха часть потенциальной энергии преобразуется в энтальпию что приводит к увеличению давления, внутренней энергии и, следовательно, температуры:

$$I = PV + U, \quad (1.2)$$

где  $I$  — удельная энтальпия воздуха (Дж/кг);  $P$  — давление воздуха (Па);  $V$  — удельный объем воздуха;  $U$  — удельная внутренняя энергия.

Нагрев воздуха в результате адиабатического сжатия практически не зависит от расхода воздуха. При этом при разработке пластов, залегающих на больших глубинах, может наблюдаться эффект, при котором в результате адиабатического сжатия температура воздуха, поступающего в выработки околоствольного двора превышает нормативные значения.

При движении воздуха снизу-вверх происходит охлаждение воздуха. Снижение температуры воздуха может сопровождаться конденсированием влаги, которая способна оказывать негативное влияние на срок службы вентиляторов главного проветривания рудников [124].

### **Тепловыделение от абсолютных источников тепла**

Абсолютный источник тепла включает в себя тепловыделения, появляющиеся в результате процессов окисления обнаженной поверхности руды, отбитого полезного ископаемого, дерева; тепловыделения в результате электрических потерь трансформаторов, источников света, кабелей, а также тепловыделения возникающие в результате работы двигателей горных машин [76].

## Тепловыделения от людей

Выполнение рабочих операций человеком неизменно связано с увеличением скорости обменных процессов в организме. При этом малая часть тепла образуется во внутренних органах, а основным источником тепловыделений являются мышцы человека. Накопленная в мышцах энергия лишь на треть затрачивается на механическую работу, оставшиеся части преобразуются в теплоту [91].

В зависимости от интенсивности выполняемых работ, параметров окружающей среды и степени тепловой изолированности тела Тимофеевой Е.И. [82] выделяются следующие механизмы отвода метаболического тепла от организма:

- кондуктивный теплообмен кожа-воздух;
- теплообмен излучением;
- теплообмен при выделении и испарении пота;
- легочный теплообмен.

Диапазон выделяемого человеком тепла варьируется от 100 до 1000 Вт, в зависимости от тяжести выполняемых работ. Для прогнозных расчетов, как правило, принимают величину тепловыделений равную 300 Вт в час от одного человека [76].

Вклад отдельных источников в итоговый тепловой баланс может изменяться в зависимости от конкретной выработки и выполняемого технологического процесса.

В работах авторов [12, 93] представлены составляющие теплового баланса выработок, выраженные в процентах (таблица 1.1). Согласно результатам экспериментальных исследований, наиболее весомый вклад в тепловой баланс вносят тепловыделения от породного массива, нагрев воздуха в результате адиабатического сжатия, а также тепловыделения от работающей техники.

Таблица 1.1 — Составляющие теплового баланса горных выработок

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

Район	Глубина работ, м	Составляющие теплового баланса, %				
		Породный массив	Окисление пород	Компрессия	Машины	Прочие
	1000	40-50	15-20	—	20-30	—
	1500	45-55	18-20	—	18-25	—

Ухудшение микроклиматических условий в забоях в первую очередь вызвано увеличением температуры воздуха. Это приводит к снижению производительности труда и отрицательно влияет на организм человека.

### Температура массива горных пород

Значительный вклад в формирование теплового режима в шахтах и рудниках вносит теплообмен между массивом горных пород и рудничным воздухом. Без принятия мер по регулированию теплового режима на расстоянии 1,5-2 километров от воздухоподающих стволов, температура воздуха принимает значения близкие температуре горных пород [110].

При этом наибольшее влияние на величину тепловыделений оказывает температура нетронутого массива [4, 12, 15, 20, 25, 51, 58, 99, 103] рассчитываемая по формуле:

$$T_{mas} = T_0 + \Gamma(H - H_0), \quad (1.3)$$

где  $T_{mas}$  — температура нетронутого породного массива на глубине  $H$  (°C);  $T_0$  — температура массива на глубине нейтрального слоя  $H_0$  (°C);  $\Gamma$  — геотермический градиент (°C/м).

Зависимость температуры горных пород от глубины представляет собой линейную функцию. При этом нарастание температуры пород происходит с различной интенсивностью в разных участках земного шара. Это обусловлено различающимися скоростями остывания земной коры, различным составом пород, а также следствием экзо- и эндотермических и радиоактивных процессов [21].

Ряд стран, осуществляющих добычу полезных ископаемых на большой глубине столкнулись с превышением температур в рабочих зонах вследствие высоких температур массива.

Согласно прогнозу по оценке угольных ресурсов Китая, общие ресурсы угля в стране составляют около 5,57 трлн тонн. Оцененные на конец 1992 года запасы угля, залегающего на глубине менее 2000 м, приведены на рисунке 1.1 [123]. Из них 2,71 трлн тонн приходятся на интервал глубин залегания 1000-2000 м. По неполным статистическим данным, в 33 парах карьеров глубиной менее 1000 м температура в забое составляет до 30-40°C [112, 122].

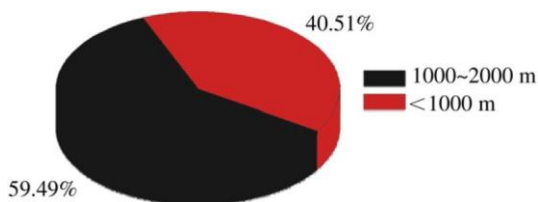


Рисунок 1.1 — Оцененные ресурсы угля в Китае, залегающие на глубине до 2000 м

Согласно данным, представленным в источнике [113], в провинции Шаньдун, Китай, насчитывается 13 угольных шахт, с температурами воздуха в забоях превышающими значение 26 °С. Из них шесть имеют температуры в диапазоне от 26 до 30 °С, а семь - температуру выше 30 °С. В провинции Цзянсу также есть угольные шахты, где температуры воздуха в забоях превышает 26 °С. Всего таких шахт пять, из которых в трех случаях температура лежит в диапазоне от 26 до 30 °С, а в двух - превышает 30 °С. В Аньхое насчитывается 10 угольных шахт с температурой в забое более 26 °С, семь из них - с температурой от 26 до 30 °С и три с температурой более 30 °С. В Хэнани 12 угольных шахт имеют температуру забоя, превышающую 26 °С, две - от 26 до 30 °С и 10 - выше 30 °С. По результатам анализа температуры массива в нескольких типовых шахтах получена зависимость распределения температуры массива от глубины ведения работ (рисунок 1.2).

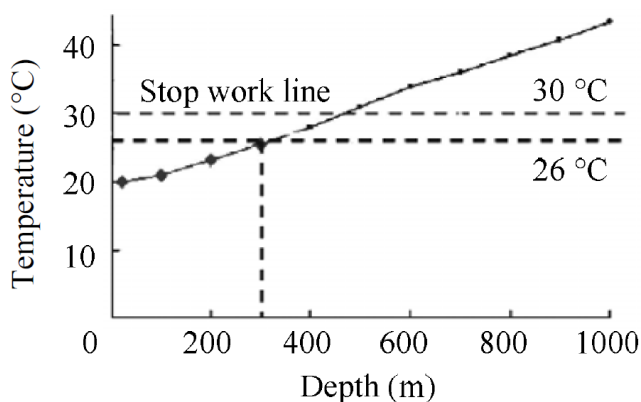


Рисунок 1.2 — Зависимость температуры массива горных пород от глубины ведения работ в угольных шахтах Китая

Некоторые из крупнейших угледобывающих стран начали подземную добычу в 1960-х годах. В 1986 году 25% шахт в Советском Союзе имели глубины разработки, превышающие 800 м, при максимуме 1329 м [134].

В литературе представлены данные обширных наблюдений и исследований на рудниках СССР [93]. В таблице 1.2 представлены результаты геотермии глубоких месторождений согласно [93].



Таблица 1.2 — Геотермия глубоких месторождений

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
Текали (Казахстан)	Полиметаллы	1100	+37
Таштагол (Горная Шория)	Железо	1100	+20
Кривой Рог (Украина)	Железо	1000	+25
Садон (Северная Осетия)	Полиметаллы	1000	+40
Субр (Урал)	Боксит	1000	+20
Донбасс (Украина)	Уголь	1200	+45
Гайское (Урал)	Медь	880	+18

В конце 1987 года средняя глубина добычи в Германии достигла 900 м; к 2000 году средняя глубина добычи в угольных шахтах Украины достигла 800 м, причем около 13,8% угольных шахт имели глубину от 1000 до 1300 м [1, 115].

В Южной Африке температура в забоях шахты № 1 Амандельбулта достигает +55°С [132, 133]. На глубине 3300 м температура в западных шахтах в ЮАР может достигать +50°С из-за горячей воды. На японском полиметаллическом руднике Фэнгю на глубине 500 м температура достигает +80°С [112].

## 1.2 Состояние микроклимата рабочих мест рудника 4 РУ Старобинского месторождения ОАО «Беларуськалий»

В разделе представлены результаты исследования микроклимата рабочих мест рудника 4 РУ Старобинского месторождения ОАО «Беларуськалий».

Исследуемый рудник относится к Старобинскому месторождению, которое расположено в окрестностях города Солигорск Минской области Республики Беларусь. Согласно данным Строительной климатологии (СНБ 2.04.02 – 2000) [77] среднемесячная температура воздуха варьируется от -6,3°С в январе до +17,8°С в июле. Глубина промерзания грунта за всю историю наблюдений не превышает 133 см. Колебания относительной влажности атмосферного воздуха составляют от 69% до 89%, что свидетельствует о влажном климате.

Площадь Старобинского месторождения составляет примерно 350 км<sup>2</sup>. Направление падения пластов – северо-восточное (с углом падения 6°). Калийная залежь включает в себя 4 горизонта (нумерация горизонтов сверху-вниз). Расстояние между пластами в разрезе соленосной толщи варьируется от 50 до 200 м [1, 79].

Глубина первого калийного горизонта составляет – 350–620 м. Глубина залегания второго калийного горизонта – 380–700 м. Третий калийный горизонт – 450–1080 м. Четвертый калийный горизонт расположен на глубине 600–1350 м.

В настоящий момент основные работы сконцентрированы на третьем калийном горизонте. В таблице 1.3 представлены результаты экспериментальных исследований температуры нетронутого массива в выработках панелей лав рудника 4 РУ.

Таблица 1.3 — Результаты экспериментальных исследований температуры нетронутого массива в выработках панелей лав

<b>Комплекс</b>	<b>Глубина, м</b>	<b>Температура массива, °С</b>
Лава №4-7	-518	21,7
Лава №4-1	-537	21,8
Лава №4-2	-571	23,0
Лава №4-8	-607	23,5
Лава №4-5	-526	21,6
Лава №4-3	-539	22,4
Лава №4-4	-621	24,9
Лава №4-9в	-583	21,2
Лава №4-13в	-520	19,5
Лава №4-15в	-502	19,4
Лава №4-12	-495	18,5
Лава №4-11	-583	21,8
Лава №4-10в	-621	24,9

Масштабная отработка III калийного пласта обуславливает необходимость применения высокопроизводительной техники, являющейся источником выделения тепла в горных выработках. Технология ведения работ при столбовой системе разработки подразумевает неравномерное подвигание забоя, что сказывается на периметре пространства очистной выработки, по которой поступает свежий воздух. Изменение периметра очистной выработки приводит к неравномерному распределению скорости движения воздуха по длине и, как следствие, изменению интенсивности теплообмена воздуха с породным массивом. Наряду с этим на температуру воздуха влияет тепло, выделяемое отбитой горной массой, имеющей температуру массива. Высокая интенсивность очистной выемки уменьшает продолжительность теплообмена, но увеличивает нагрузку на приводы скребкового и ленточного конвейеров. Кроме того,

источником тепловыделений является непосредственно выемочный комбайн.

Влияние указанных факторов в совокупности с большой глубиной залегания III калийного горизонта приводит к образованию высоких температур в рабочих зонах. Результаты экспериментальных исследований указывают на то, что наиболее остро вопрос неблагоприятных микроклиматических параметров в рабочих зонах стоит на руднике 4 РУ, что обусловлено большой глубиной ведения работ. Согласно выполненным замерам в 10 из 13 рабочих зон зафиксированы превышения температур воздуха.

В ходе температурно-влажностной съемки установлено, что существующие превышения в основном носят локальный характер и относятся к участку энергопоезда. Работа оборудования входящего в состав энергопоезда сопровождается тепловыделениями и нагревом воздуха до 35,6 °С (лава №4-10в). Впоследствии в результате теплообмена с массивом температура воздуха снижается, принимая значения, близкие к температуре массива в районе вентиляционного штрека.

### **1.3 Нормирование микроклимата в Российской Федерации и Республике Беларусь**

В Российской Федерации микроклиматические условия в подземных горных выработках регламентируются нормативными документами, представленными ниже:

- Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых [66] – на горных предприятиях за исключением угольных и нефтяных шахт.
- Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности [64] – на нефтяных шахтах.
- Правила безопасности в угольных шахтах [65].

Согласно пункту 152 «Правил безопасности при ведении горных работ ...» [66] температура воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок и на рабочих местах с постоянным присутствием персонала не должна превышать +26°С. При температуре свыше +26°С должно предусматриваться его охлаждение. Следует отметить, что предыдущая редакция документа, допускала возможность применения организационных мероприятий, предусматривающих режим работы персонала с перерывами на отдых в специально оборудованных местах при превышении указанной температуры.

Требования к параметрам микроклимата в горных выработках нефтяных шахт учитывают технологические особенности добычи. На нефтяных шахтах применяется термощахтный способ добычи, предусматривающий искусственный нагрев массива

горных пород до температур +100°C и выше. Это делает невозможным или экономическое не целесообразным обеспечение температуры +26°C в добычных горных выработках. Также данный способ не предусматривает постоянного нахождения горнорабочих в добычных выработках в пределах разогретого массива горных пород. С учетом этих особенностей согласно пунктам 1746-1747 «Правил безопасности ...» температура воздуха в добычных, подготовительных и других действующих выработках у мест, где работают люди, не должна превышать +26°C при относительной влажности до 90% и +25°C - при относительной влажности свыше 90%, а в горных выработках, в которых проводятся закачка теплоносителя в пласт, отбор продукции добывающих скважин, проложены трубопроводы с температурой наружной поверхности 40°C и выше (далее - "горячие" трубопроводы), а также в емкостях нефтеловушек допускается температура рудничной атмосферы до +36°C включительно при условии, что в этих горных выработках люди не находятся постоянно в течение всей рабочей смены.

Отдельным образом осуществляется нормирование параметров микроклимата в угольных шахтах. На сегодняшний день согласно пункту 121 «Правил безопасности в угольных шахтах» расход, состав, скорость и температура воздуха в горных выработках должны быть определены в документации на ведение горных работ. Предыдущая редакция правил, ссылалась на ныне не действующий документ СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений», применяющийся для поверхностных производственных помещений. Взамен этому документу с 01.03.2021 введен в действие СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», требования которого приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 — Допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах согласно СанПиН 1.2.3685-21

Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха в диапазоне выше оптимальных величин, °С	Скорость движения воздуха для температур выше оптимальных величин, м/с, не более
Ia (до 139)	25,1-28,0	0,2
Iб (140-174)	24,1-28,0	0,3
IIa (175-232)	22,1-27,0	0,4
IIб (233-290)	21,1-27,0	0,5
III (более 290)	20,1-26,0	0,5

При превышении допустимых параметров микроклимата также руководствуются методическими рекомендациями МР № 2.2.8.0017-10 от 28.12.2010 «Режимы труда и отдыха работающих в нагревающем микроклимате в производственном помещении и на

открытой местности в теплый период времени года», параметры приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 — Время пребывания на рабочих местах согласно МР № 2.2.8.0017-10

Температура воздуха на рабочем месте, °С	Время пребывания, не более при категориях работ, часов		
	Категория Ia-Iб	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

Расчет эффективной температуры является одним из методов количественной оценки воздействия всех параметров микроклимата на организм человека. Одинаковые значения эффективной температуры соответствуют таким комплексам микроклиматических параметров воздуха, которые характеризуются одинаковым теплоотводом с поверхности тела и одинаковыми тепловыми ощущениями работника. В таблице 1.6 представлены результаты расчета эффективной температуры при различных сочетания микроклиматических параметров. Некоторые из этих параметров соответствуют установленным нормативам для микроклимата в горных выработках, в то время как другие не удовлетворяют данным требованиям.

Таблица 1.6 — Микроклиматические параметры воздуха, соответствующие одинаковой температуре сухого термометра и эффективной температуре воздуха

Температура воздуха по сухому термометру, °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

Как следует из приведенных в таблице данных допустимой в «Правилах безопасности при ведении горных работ ...» температуре воздуха +26°С в зависимости от относительной влажности и скорости движения воздуха соответствуют существенно различные эффективные температуры, а значит, и тепловые ощущения. И наоборот, если принять предельно допустимой именно эффективную температуру воздуха со значением

+26°C, то, например, за счет повышения скорости движения воздуха можно увеличить температуру по сухому термометру до значения +30°C без ухудшения теплоотвода с поверхности тела горнорабочего и снижения комфортности ощущений.

Для горных предприятий РФ в работах [26] и [30] представлены подходы к нормированию микроклиматических параметров воздуха, отличающихся тем, что:

- соответствуют требованиям действующей нормативной документации по ведению горных работ, гигиеническим требованиям и нормативам;
- учитывают сочетанное влияние параметров микроклимата на организм работника;
- учитывают время и тяжесть работ.

Для регламентирования времени работы персонала при температуре воздуха выше +26 °C предложен следующий критерий нормирования микроклиматических условий, представляющий собой линеаризованную ощущаемую температуру:

$$ET = t_d + 0,00653\varphi(t_d - 9,06) - 0,7V - ET_0, \quad (1.4)$$

где  $t_d$  — температура воздуха по сухому термометру, °C;  $\varphi$  — относительная влажность воздуха, %;  $V$  — скорость движения воздуха, м/с;  $ET_0$  — параметр калибровки ощущаемой температуры в зависимости от микроклиматических особенностей шахты или рудника.

Данный критерий получен аналитическим сравнением целого ряда показателей нормирования микроклимата, таких как температуры воздуха по сухому и мокрому термометрам, WBGT-индекса и TNC-индекса, ощущаемой температуры, эффективной температуры [26].

При организации отдыха персонала и с учетом пребывания рабочих в различных микроклиматических условиях в течение смены к нормированию предложено принимать усредненное значение критерия

$$\overline{ET} = \frac{1}{L} \sum_i ET_i \cdot L_i, \quad (1.5)$$

где  $L$  — протяженность рабочего места и места отдыха, м;  $ET_i$  — эффективная температура воздуха на  $i$ -ом участке пребывания рабочего, °C;  $L_i$  — длина  $i$ -ого участка пребывания рабочего, м.

Для определения предельного значения критерия и регламентирования времени отдыха и работы персонала предложено использовать требования СанПиН 2.2.4.548-96. Рассчитанное осредненное значение критерия на рабочем месте с учетом периодов отдыха следует сравнивать с допустимой температурой, определяемой в зависимости от продолжительности смены и категории работ по энергозатратам. Например, согласно

предложенной системе для профессий горнорабочих со II категорией энергозатрат при 6-ти часовой рабочей смене допускается такой режим работы, при котором осредненный критерий за время смены не превышает  $+28^{\circ}\text{C}$  при максимально допустимом значении температуры воздуха на рабочем месте  $+31,5^{\circ}\text{C}$  и предельно допустимом времени пребывания не более 1 часа.

Однако ни рассмотренные ранее, ни предложенная выше система нормирования микроклиматических условий не учитывают оценку условий труда на производстве согласно Методике проведения специальной оценки условий труда [59], которая проводится в том числе по фактору микроклимата.

Специальная оценка выполняется для определения класса условий труда (допустимый, вредный или опасный) в зависимости от степени воздействия вредных факторов на производстве. Оценка условий труда по фактору микроклимата осуществляется на основе определения и расчета средневзвешенного значения ТНС-индекса.

Рассмотрим нормирование микроклиматических условий на калийных рудниках Республики Беларусь (РБ). На сегодняшний день основным документом, регламентирующим требования к подземной разработке соляных месторождений РБ, являются «Правила технической безопасности при разработке подземным способом...» [67]. В версии документа от 30.08.2012 присутствовал пункт 171 который гласил: «Температура воздуха в подготовительных, очистных и других действующих выработках не должна превышать  $+26^{\circ}\text{C}$ . При температуре свыше  $+26^{\circ}\text{C}$  должны приниматься меры по ее снижению или улучшению микроклимата на рабочих местах», при этом отсутствуют показатели теплового стресса, учитывающие комплексное воздействие факторов, оказывающих влияние на здоровье работников при наличии нагревающего микроклимата. Кроме того, не регламентируется время пребывания работников в выработках с различными микроклиматическими условиями, а также уровень энергозатрат при выполнении работ различной тяжести. Из действующей редакции документа данный пункт был исключен, а вместо него появился п.230 который гласит: «В рудниках с температурой воздуха на рабочих местах более  $+26^{\circ}\text{C}$  должны производиться замеры температуры воздуха. Результаты замеров температуры, а также анализы качественного состава воздуха заносятся в вентиляционный журнал», при этом отсутствуют какие-либо требования к верхней границе допустимой температуры и необходимости ее снижения.

В связи с вышеизложенным исследование вопроса нормирования микроклиматических условий в горных выработках с нагревающим микроклиматом

является актуальным. Формирование единого подхода, комплексно учитывающего особенности влияния микроклимата на организм рабочего, позволит снизить риски неблагоприятного теплового воздействия на организм человека и в то же время исключить необоснованные запасы систем кондиционирования при разработке систем управления тепловым режимом горных предприятий.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что действующие нормативные документы отражают вопрос нормирования микроклимата либо не в полной мере, либо не распространяются на предприятия, осуществляющие подземную разработку полезных ископаемых, и нуждаются в доработке.

Помимо этого, задача оценки уровня воздействия нагревающего микроклимата осложняется нестационарностью производственных процессов, наличием факторов, оказывающих периодическое влияние на микроклимат (тепловыделения от движущегося автотранспорта, режимы работы техногенных источников тепловыделения) и постоянным смещением зон ведения работ. В этом случае оценка уровня воздействия теплового фактора является проблематичной. Потребность в определении уровня теплового воздействия на работников, диктует необходимость решения проблемы непредсказуемости, т.к. важно знать, какие факторы оказывают влияние на тепловой режим в конкретном месте пребывания, какие значения они имеют и какой вклад вносят в итоговое значение показателя тепловой нагрузки.

Все результаты, описанные в данном разделе, опубликованы в работах [7, 27, 28].

#### **1.4 Анализ методов прогнозирования температурных условий**

Интенсивное изучение теплового режима горных выработок началось в 1950-х годах в связи с необходимостью разработки глубоких залежей с неблагоприятным микроклиматом.

Первые исследования процессов тепломассообмена, принадлежат авторству Б. Черника и Б. Шточеса и датируются 30-ми годами 20 века [10]. В то же время формулы, описывающие данные процессы, основаны на стационарном теплообмене между воздухом и массивом горных пород и недостаточно точно отражают реальный характер протекающих процессов.

Впоследствии разработкой методов расчета теплового режима горных выработок занимались как советские ученые [4, 6, 15, 17, 19, 45, 58, 60, 81, 90, 95, 99, 101, 100, 102, 103], так и исследователи из других стран [10, 43, 107, 117,].

Существуют различные подходы к прогнозированию тепловых условий: это эмпирические методы, эмпирико-аналитические методы и аналитические методы. В



середине 1970-х годов началось активное развитие численных методов для прогнозирования тепловых режимов, и они получили широкое применение.

Эмпирические методы опираются на результаты тепловых съемок и закономерности, выявленные в конкретных шахтах и рудниках [16, 33]. Несмотря на их относительную простоту в использовании, стоит отметить, что они имеют свои ограничения, в первую очередь, связанные с ограниченным объемом доступных данных, а также ограничением применения в условиях сетевой постановки задач.

Температурные распределения, полученные с помощью этих методов, как правило, характеризуются линейной зависимостью, хотя на самом деле температурные изменения в подземных выработках рудников ближе к экспоненциальному закону [32, 75]. Это является важным аспектом, который следует учитывать при анализе данных, полученных с использованием эмпирических методов.

Таким образом, при использовании эмпирических методов в исследованиях по улучшению микроклиматических условий в подземных выработках рудников необходимо учитывать ограниченность данных и несовершенство моделирования температурных распределений, основанных на таких методах. Возможно, в контексте сетевых задач следует рассмотреть более точные и сложные методы моделирования тепловых процессов для достижения более точных результатов.

Аналитические методы опираются на строгие математические решения и обычно включают в себя применение интегрального преобразования Лапласа [5, 42, 57, 87]. Необходимо, однако, отметить, что эти методы, несмотря на их теоретическую точность, ограничены в практическом применении в расчетах теплового режима шахт и рудников из-за сложности математических решений, которые они требуют.

Более широкое применение нашли аналитически приближенные методики. Эти методики основаны на простых математических формулах, представленных в работах Ю.Д. Дядькина, А.Ф. Воропаева, С.Г. Гендлера, А.Н. Щербаня и О.А. Кремнева. В данных методиках нестационарный теплообмен учитывается путем введения коэффициента нестационарного теплообмена. На основе этих методик был разработан ряд зависимостей и формул, которые могут быть применены к различным типам подземных выработок. Эти зависимости и формулы предоставляют возможность оценивать коэффициент нестационарного теплообмена в различных условиях и при разных временах проветривания. Важно отметить, что данный метод имеет свои ограничения и не может использоваться для решения задач нестационарного теплообмена в рудниках с разветвленной сетью горных выработок и множеством диагональных соединений.

Использование коэффициента нестационарного теплообмена предоставляет возможность прогнозировать нестационарные процессы теплообмена между воздухом и массивом горных пород. Тем не менее, попытки усовершенствовать этот метод путем внесения корректировок и поправочных коэффициентов не дали желаемых результатов.

Решение данной проблемы заключается в применении численных методов для расчета теплового режима. Использование численных методов позволяет отказаться от упрощения исходных уравнений и вместо этого решать задачу с использованием вычислительной математики с последующей реализацией на компьютерах.

Анализ процессов теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород в рудниках криолитозоны позволяет выполнить модель, разработанная сотрудниками лаборатории горной теплофизики ИГДС СО РАН.

При решении данной задачи в модели учтены граничные условия, задаваемые в начале и конце выработки, а также на внешнем радиусе, который соответствует радиусу теплового воздействия. Решение задачи осуществляется с применением явной численной схемы методом конечных разностей.

Разработка данной модели была выполнена в программно-вычислительном комплексе, базирующемся на языке программирования FORTRAN-77. Этот комплекс позволяет не только решать задачи по распределению тепла, но также проводить анализ распределения воздуха в системе вентиляции рудников. Следует отметить, что модель успешно прошла апробацию и продемонстрировала высокую точность в предсказании результатов.

Сотрудниками ГИ УрО РАН разработана альтернативная модель, предназначенная для анализа нестационарного теплообмена между воздухом и окружающим породным массивом. Эта модель позволяет решать задачу, связанную с созданием и поддержанием оптимального микроклимата в калийных рудниках [38]. В данной модели задача формирования микроклимата решается при помощи уравнений баланса теплоты в породном массиве и воздухе, а также их сопряжении на границе между средами с использованием граничных условий третьего рода.

Следует отметить, что аналитическое решение этой задачи в виде элементарных функций невозможно, поскольку оно осуществляется с применением преобразования Лапласа по времени и получается в виде квадратур. Для численного решения этой задачи был разработан программно-вычислительный модуль. Важным достоинством разработанной модели является способность корректно моделировать теплообмен для разных временных интервалов.

Изменения и усовершенствования модели были представлены в научных работах [40,54]. Эти изменения позволили учесть геотермическое распределение температур в непотревоженном породном массиве при моделировании динамики температуры воздуха и массива горных пород на небольших глубинах воздухоподающих и вентиляционных стволов.

В отличие от работ, рассмотренных ранее, в исследованиях, проведенных О.И. Дударем, Е.С. Дударь и Н.Н. Мохиревым [23,24] предложена модель в которой решение задачи достигается с использованием интеграла Лайона и приближения, связанного с логарифмическим профилем скоростей. Представленная модель позволяет рассчитывать процессы теплопереноса в горизонтальных выработках калийных рудников.

Для угольных шахт была разработана математическая модель, предназначенная для оценки нестационарных процессов, связанных с распределением воздуха, тепла и газа в системе подземных выработок [14]. Данная математическая модель основана на решении системы уравнений, включающей уравнение неразрывности, уравнения движения и уравнения энергии, записанных для парциальных плотностей компонентов в каждой выработке. Уравнения связываются на сопряжении выработок на основе законов сохранения массы, энергии и концентрации примесей. Важным аспектом модели является то, что температуры стенок выработок является переменной, и для ее расчета в модель включено уравнение теплопроводности в массиве.

В представленной модели коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  рассчитывается с учетом как вынужденной, так и свободной конвекции газа в выработках, с использованием эмпирических формул, учитывающих наклон выработок. Эта математическая модель подходит для моделирования аварийных режимов вентиляции, при воздействии мощных источников тепловыделения, таких как подземные пожары, взрывы и выбросы газа. Модель внедрена в программный комплекс «Вентиляция 2.0» и активно используется для разработки мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций в угольных шахтах [61]. Недостатком разработанной модели является то, что она может быть применима только для моделирования быстро протекающих аварийных сценариев вентиляции.

Методики, модели и программы расчета представленные в работах [34, 47], могут использоваться для расчета теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом в несопряженной постановке. При этом данные расчеты могут быть использованы только для моделирования быстропротекающих аварийных режимов проветривания, а результаты расчетов можно описать как удовлетворительные.

Среди зарубежных исследований данной тематики можно выделить работы K.L. Gibson и M.J. McPherson [13, 109, 126]. Однако следует отметить, что описанные в работах модели лишь усовершенствуют предыдущие исследования, основанные на получении приближенных решений известными аналитическими методами.

Несмотря на многообразие исследований, существующие подходы не учитывают важный фактор, оказывающий влияние на формирование микроклимата в рабочих зонах длинных очистных забоев калийных рудников — нестационарный характер работы тепловыделяющего оборудования. В длинном очистном забое основными источниками тепловыделений являются конвейер и оборудование энергопоезда. Для повышения методов прогноза температурных условий в рудниках требуется развитие численных методов моделирования термодинамических процессов.

### **1.5 Способы борьбы с нагревающим микроклиматом**

Мероприятия по снижению негативного влияния нагревающего микроклимата можно разделить на мероприятия по предотвращению возникновения последствий и на мероприятия по ликвидации последствий.

Мероприятия по предотвращению последствий, в свою очередь, делятся на организационные и технические (горнотехнические и теплотехнические) мероприятия. Организационные мероприятия, как правило, рассматриваются в первую очередь, поскольку в большинстве случаев позволяют избежать высоких затрат на их реализацию. К организационным мероприятиям относятся те, которые не оказывают влияния на значение среднесменного ТНС-индекса:

- контроль микроклимата в выработках (ежесменный контроль ТНС);
- использование программ, осуществляющих прогноз температурных условий в рабочих зонах;
- скрининговые тесты работников;
- обеспечение работников питьевой водой;
- ротация рабочих и организация работ в забое;
- акклиматизация;
- использования СИЗ (использование одежды, отводящей тепло);
- обучение работников работе в условиях нагревающего микроклимата;
- медицинские осмотры/диспансеризация.

И те, которые оказывают влияние на среднесменный ТНС-индекс работника:

- организация регламентированного режима работы с использованием мест со сниженной тепловой нагрузкой.

Технические мероприятия можно поделить на горнотехнические и теплотехнические.

Горнотехнические мероприятия направлены на снижение нагрева воздуха при движении до потребителя за счет увеличения расхода воздуха, применения рециркуляции, а также уменьшения выделений тепла от местных источников тепла.

Главным недостатком горнотехнических мероприятий является их ограниченная эффективность.

Теплотехнические мероприятия подразумевают использование сложных систем (как правило кондиционеров). При высокой эффективности недостатком применения такого способа охлаждения являются большие капитальные и эксплуатационные затраты.

Общая схема мероприятий по снижению влияния негативного влияния неблагоприятных параметров микроклимата на здоровье работников представлена на рисунке 1.3.

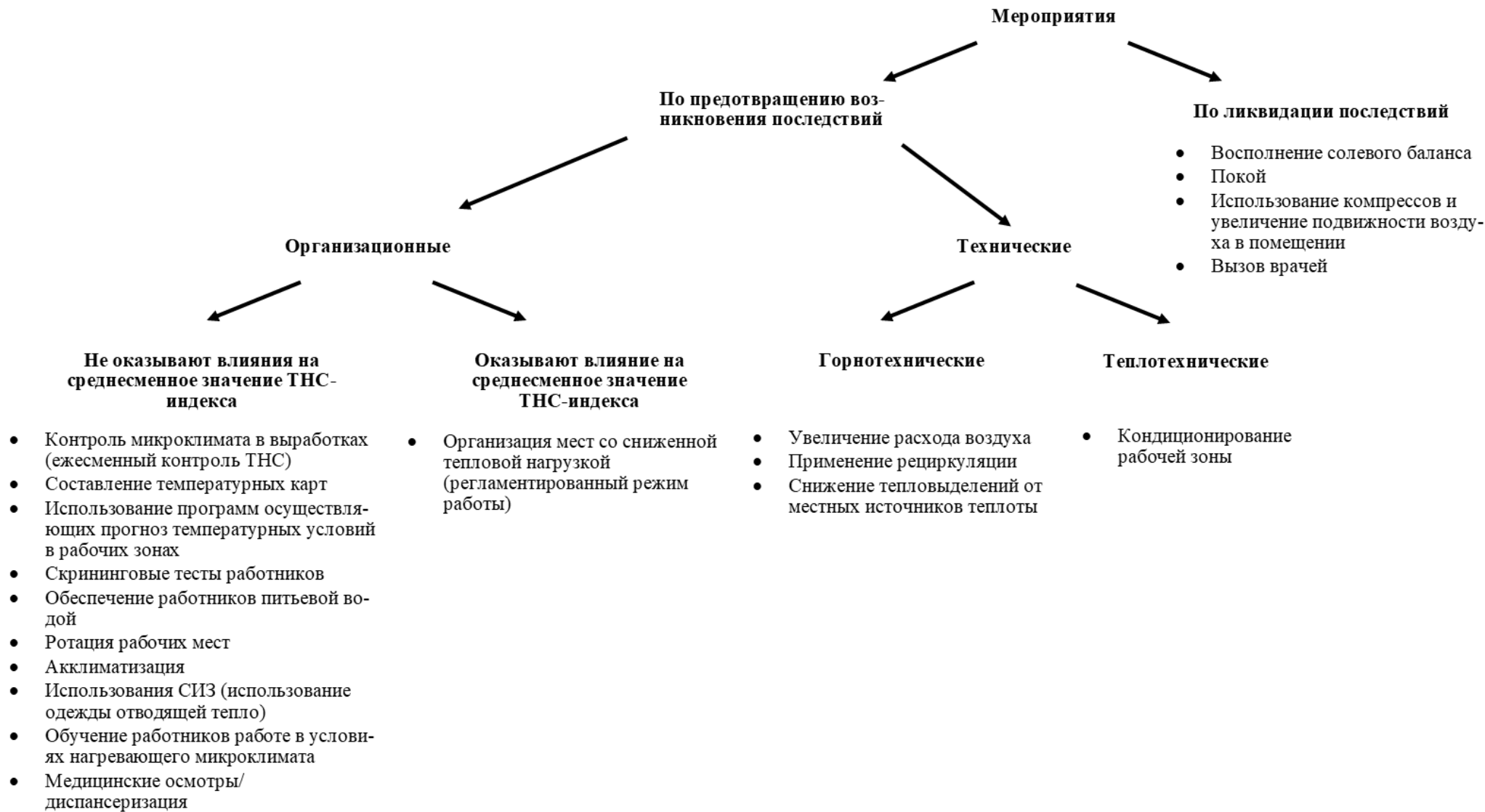


Рисунок 1.3 — Классификация мероприятий, направленных на снижение влияния неблагоприятных параметров микроклимата на работников

### **1.5.1 Организационные мероприятия**

Перед планированием мероприятий по снижению величины тепловой нагрузки необходимо понимать какие участки рудника представляют опасность. Для этого на предприятиях необходимо разрабатывать температурные карты и классифицировать выработки по уровню тепловой опасности.

#### **Составление температурных карт**

Для составления температурных карт необходимо проведение температурных съемок во всех действующих выработках рудника. Съемка подразумевает измерение параметров, характеризующих тепловой режим.

По итогам выполненной съемки каждой рабочей зоне присуждается класс опасности.

При трудоустройстве новых работников необходимо выполнить ряд мероприятий, способствующих оценке функционального состояния организма. К таким мероприятиям относятся:

- скрининговый тест;
- акклиматизация;
- обучение работника работе в условиях нагревающего микроклимата.

#### **Скрининговые тесты**

Работа в условиях нагревающего микроклимата способствует развитию тепловых заболеваний. Скорость развития заболеваний зависит от ряда факторов, одним из них является индивидуальная непереносимость тепла.

Непереносимость тепла – это неспособность организма человека поддерживать тепловой баланс во время выполнения рабочих операций.

Для выявления работников с непереносимостью тепла оборудуется специальное помещение, имитирующее нагревающую среду (температура воздуха +40°C, относительная влажность воздуха 40%). Процедура проведения испытаний основана на протоколе, опубликованном в работе [108]. Участники испытания осуществляют ходьбу по беговой дорожке в течение 2 часов со скоростью 5 км/ч и уклоном 2°C. Испытуемые обеспечиваются питьевой водой в неограниченном количестве. Объем потребляемой жидкости фиксируется для расчета скорости потоотделения.

В случае, если у испытуемого наблюдается хотя бы один из симптомов, представленных ниже, работника относят к непереносимым тепло:

- температура тела > +38,5°C;

- частота сердечных сокращений >150 ударов в минуту;
- температура тела не выходит на плато (увеличение температуры тела > 0,45°С в течение второго часа испытаний);

По результатам исследований работники с непереносимостью тепла могут быть задействованы для работ только на участках, исключая воздействия высоких температур воздуха на организм (выработки, отнесенные к допустимому классу тепловой опасности).

### **Акклиматизация**

Акклиматизация – способность организма противостоять тепловому стрессу, нарабатываемая путем постепенного ухудшения микроклиматических условий в течение акклиматизационного периода.

Акклиматизация позволяет снижать уровень ощущаемой нагрузки и риск возникновения тепловых расстройств организма за счет:

- снижения пульса;
- снижения температуры тела;
- увеличения скорости потоотделения;
- снижения концентрации натрия в поте.

Акклиматизация обязательна для работников, задействованных в выработках вредных/опасных по температурному фактору.

Для новых сотрудников акклиматизация включает в себя следующий цикл:

- 1 день: уровень рабочей нагрузки и времени работы составляет 50% от нормы;
- 2 день: уровень рабочей нагрузки и времени работы составляет 60% от нормы;
- 3 день: уровень рабочей нагрузки и времени работы составляет 70% от нормы;
- 4 день: уровень рабочей нагрузки и времени работы составляет 80% от нормы;
- 5 день: уровень рабочей нагрузки и времени работы составляет 90% от нормы;
- 6 день: уровень рабочей нагрузки и времени работы составляет 100% от нормы.

Для работников, вернувшихся из отпуска (более 7 дней), акклиматизация включает в себя следующий цикл:

- 1 день: уровень рабочей нагрузки и времени работы составляет 50% от нормы;
- 2 день: уровень рабочей нагрузки и времени работы составляет 70% от нормы;
- 3 день: уровень рабочей нагрузки и времени работы составляет 90% от нормы;
- 4 день: уровень рабочей нагрузки и времени работы составляет 100% от нормы.



## **Обучение работников работе в условиях нагревающего микроклимата**

Все работники, принимаемые на работу, а также те, кто уже длительное время трудится в условиях потенциально опасного нагревающего микроклимата, способствующего развитию профессиональных заболеваний, должны проходить соответствующее периодическое обучение, в рамках которого будут осведомлены о рисках, связанных с работой в условиях нагревающего микроклимата, о признаках ухудшения здоровья и о правилах оказания первой медицинской помощи [116]:

### **Ротация рабочих и организация работ в забое**

Ротация рабочих и организация работ в забое – это структурированный обмен работниками между различными рабочими местами/режимами работы, требующий, чтобы работники чередовались между различными рабочими зонами/режимами работы через определенные промежутки времени.

Цель ротации работ заключается в снижении накопительного эффекта от воздействия неблагоприятного микроклимата за счет увеличения времени на восстановление организма.

Организация работ в очистном забое подразумевает три добычные смены и одну ремонтную. При составлении сменных графиков работников, задействованных в выработках вредных/опасных по тепловому воздействию необходимо руководствоваться принципом минимального цикла работы в неблагоприятных условиях. График отдельно взятого работника должен быть выстроен таким образом чтобы после добычной смены следовала ремонтная. По итогам двух рабочих смен работнику должен предоставляться выходной.

Ротация рабочих и организация работ в забое позволит исключить/замедлить развитие заболеваний за счет восстановления организма в периоды отдыха.

### **Диспансеризация**

Все работники должны проходить медицинский осмотр с периодичностью не менее одного раза в год.

В ходе диспансеризации должна быть получена следующая информация:

- Информация о перенесенных заболеваниях, которые могут быть связаны с работой сердечно-сосудистой, нервной, пищеварительной и репродуктивной систем, органов дыхания, почек. А также информацию о состоянии кожи, эндокринной системы, опорно-двигательной системы и обмене веществ.
- Полный список всех препаратов, принимаемых по рецепту, а также безрецептурных лекарств.

- Данные о привычках, которые могут влиять на способность переносить перегрев, такие как потребление алкоголя, кофе и других напитков.

Результаты медицинского осмотра должны включать:

- Анализ мочи.
- Измерение артериального давления.
- Оценку способности работника распознавать опасности, связанные с риском для жизни и здоровья; оценку способности понимать, необходимые меры безопасности; способность ориентироваться в пространстве при возможном возникновении ЧС.
- Перечень препаратов, которые могут негативно сказаться на акклиматизации и способности тела выдерживать работу в нагревающего микроклимата.
- Данные о заболеваниях кожи, случаи повреждения больших участков кожи или нарушение ее механизма теплоотвода путем испарения. У некоторых людей может быть нарушена функция потовых желез (ангидроз), что может привести к плохой переносимости воздействия нагревающего микроклимата.
- Данные об индексе массы тела работника.

### **Использование СИЗ**

Плотность и проницаемость одежды напрямую влияет на терморегуляцию организма. Так неправильно подобранный комплект спецодежды способен препятствовать отведению тепла от организма, а также вызывать дополнительные затраты энергии на носку комплекта.

Согласно [72], теплоизоляция комплекта одежды должна составлять не более 0,8 кло (1 кло=0,155 м<sup>2</sup>·К/Вт).

### **Организация контроля микроклимата в выработках**

Контроль температуры и влажности воздуха необходимо осуществлять на рабочих местах и на замерных станциях. Замеры выполняются горными мастерами или иными лицами, на которых возложены данные обязанности.

Контрольно-измерительные приборы должны обеспечивать измерение значений параметров в возможном диапазоне их изменения и с погрешностью, не выходящей за границы норм метрологического обеспечения, установленных на предприятии. Контрольно-измерительные приборы должны быть исправными, иметь пломбы и действующие калибровочные клейма.

Контролю подвергаются выработки, отнесенные к вредным/опасным по результатам проведенных температурных съемок.

В случае превышения параметров необходимо применять мероприятия по снижению среднесменного ТНС-индекса.

### **Организация режим труда и отдыха с использованием мест со сниженной тепловой нагрузкой**

#### **Регламентированный режим работы и отдыха**

Цель данного мероприятия заключается в улучшении условий труда и повышении безопасности работ путем рационального изменения режимов труда и отдыха рабочих в условиях нагревающего микроклимата. Отдых работников должен осуществляться в специально оборудованных местах либо в выработках, микроклиматические параметры которых соответствуют оптимальным (температура воздуха должна быть в пределах 19-22°C, относительная влажность – 40-60%, скорость движения воздуха 0,1-0,2 м/с).

В целях защиты работников от возможного перегревания, при температуре воздуха на рабочих местах выше допустимых величин, время пребывания на рабочих местах (непрерывно или суммарно за рабочую смену) должно быть ограничено величинами, указанными в таблице 1.7 согласно [71]. Остальные показатели микроклимата на рабочих местах должны быть в пределах допустимых величин.

Среднесменная температура воздуха рассчитывается по формуле (1.6):

$$T_{\text{ср.см}} = \frac{T_1 \cdot r_1 + T_2 \cdot r_2 + \dots + T_n \cdot r_n}{r_1 + r_2 + \dots + r_n}, \quad (1.6)$$

где  $T_1, T_2, T_n$  – температура воздуха в пунктах замера 1,2,n соответственно;

$r_1, r_2, r_n$  – время пребывания работника в окрестностях соответствующего пункта замера.

Таблица 1.7 — Время пребывания на рабочих местах при температуре воздуха выше допустимых величин

Температура воздуха на рабочем месте, °С	Время пребывания, не более при категории работ, ч	
	Iа-Iб	IIа - IIб
32,5	1	-
32,0	2	-
31,5	2,5	1
31,0	3	2
30,5	4	2,5
30,0	5	3
29,5	5,5	4
29,0	6	5
28,5	7	5,5
28,0	8	6
27,5	-	7
27,0	-	8
26,5	-	-
26,0	-	-

**Примечание:** МГВМ и ГРОЗ имеют категорию энергозатрат IIа-IIб. Среднесменная температура воздуха на рабочих местах и местах отдыха в течение рабочей смены не должна выходить за пределы допустимых величин для соответствующих категорий работ, указанных в таблице.

Указанное мероприятие позволяет добиться требуемых микроклиматических параметров без применения кондиционирования, однако при высоких температурах производительность отдельных очистных забоев может существенно снижаться ввиду сокращения времени, отведенного на выполнения рабочих операций. Выходом из данной ситуации может служить увеличение штата работников, входящих в звено.

### 1.5.2 Горнотехнические мероприятия

Горнотехнические методы регулирования теплового режима позволяют снижать температуру рудничного воздуха за счет изменения технологии ведения горных работ, схем вентиляции и крепления горных выработок [26].

Горнотехнические мероприятия согласно [2, 22, 96] включают в себя:

- улучшение проветривания выемочных участков, за счет применения рациональных схемы вскрытия и вентиляции, увеличения расхода воздуха, подаваемого на проветривание, обособленного проветривания камер служебного назначения;

- снижение величины тепловыделений от массива горных пород за счет теплоизоляции стенок выработок;
- уменьшение запыленности стенок выработок, замены деревянной крепи на другие материалы, орошения отбитой горной массы для снижения температуры воздуха вследствие окислительных процессов;
- уменьшение интенсивности тепловыделений от источников за счет замены электрических и дизельных приводов горных машин на пневматические;
- изоляция свежей струи от источников тепловыделений.

Горнотехнические методы, при грамотном подборе, оказываются более экономически выгодными по сравнению с теплотехническими [26]. Однако для обоснования и разработки таких методов необходимы многовариантные тепловые расчеты параметров воздуха и горных пород. В этом случае для моделирования горнотехнических методов, таких как теплоизоляция стенок выработок и нанесение на них специальных антиокислительных покрытий, используются различные модели теплопереноса в неоднородных горных массивах. Например, двухслойная модель системы "теплоизоляция - массив", представленная в работе [48], является более строгой, чем модели, основанные на понятии о коэффициенте теплопередачи теплоизоляции, которое справедливо только для стационарных температурных полей.

Среди последних исследований, посвященных разработке горнотехнических методов, следует отметить работы В.А. Бойко [7, 10, 62], в которых рассмотрены способы ускоренного растепления породного массива горных выработок на примере условий угольных шахт Донбасса. Однако, общим недостатком всех горнотехнических методов, применяемых для регулирования теплового режима, является их ограниченная эффективность, которая в значительной степени зависит от геологических и горнотехнических особенностей месторождений, на которых они применяются. Опыт регулирования теплового режима показывает, что наибольшую эффективность горнотехнические методы имеют при их применении в переходном интервале глубин (предшествующем более строгим тепловым условиям).

### **1.5.3 Теплотехнические мероприятия**

Теплотехнические методы регулирования теплового режима в сравнении с горнотехническими мероприятиями [11] требуют применения сложного оборудования, способного изменять термодинамические параметры воздуха, что влечет за собой увеличение капитальных и эксплуатационных затрат. Из-за высокой капиталоемкости, необходимо тщательно рассчитывать и проектировать теплотехнические способы [2, 94],

что невозможно без развития методов математического моделирования процессов кондиционирования шахтного воздуха и работы различных охлаждающих устройств для оптимизации средств и систем регулирования шахтного микроклимата [85,86].

Охлаждающие устройства для регулирования температуры шахтного воздуха включают в себя различные технические средства, такие как поверхностные и подземные холодильные машины, водо- и воздухоохладители, передвижные кондиционеры, теплообменники, воздухопроводы с холодным воздухом и другие [84, 97, 98].

В зависимости от расположения теплообменных аппаратов и места выдачи охлажденного воздуха, все воздухоохладительные установки для шахт и рудников можно разделить на 5 групп [98]:

- установки для охлаждения рудничного воздуха расположенные на поверхности;
- установки, охлаждающие рудничный воздух на горизонте при размещении холодильных машин на поверхности;
- установки для охлаждения рудничного воздуха с использованием холодильных машин на глубоком горизонте, при которых теплота конденсации отводится на поверхность;
- установки для охлаждения рудничного воздуха с использованием холодильных машин на глубоком горизонте, при которых теплота конденсации отводится подземным способом;
- комбинированные установки для охлаждения рудничного воздуха, использующие различные технологии и методы для достижения желаемого эффекта охлаждения.

Результаты исследований конвективного теплообмена влажного воздуха в охлаждающих устройствах были описаны в работах нескольких авторов, включая Л.Д. Бермана, А.В. Болгарского, А.А. Гоголина, Н.М. Жаворонкова, Р.М. Ладыженского, Л.М. Кудряшова и А.В. Нестеренко. В этих работах были получены критериальные зависимости для коэффициентов тепло- и массообмена, что позволяет осуществлять инженерный расчет охлаждающих устройств. В работах А.Н. Щербаня, О.А. Кремнёва, В.Я. Журавленко, А.Н. Ягельского, Н.Н. Хохотвой, В.Н. Кефер, В.К. Черниченко, М.В. Юцкевича, Ю.А. Цейтлина и Г.В. Аверина приведены исследования теплообменных и режимных параметров, для моделирования охлаждающих устройств в шахтах. С 1970-х годов начали разрабатываться локальные средства охлаждения, такие как душирующие устройства, подающие охлажденный воздух в призабойную часть тупиковой выработки или в участок лавы [84], охлаждаемые

элементы забойного оборудования [104] и средства индивидуальной противотепловой защиты горнорабочих [31, 89].

Наиболее распространенными мероприятиями в вопросах нормализации параметров микроклимата выступают применение систем кондиционирования воздуха (СКВ), средств индивидуальной защиты (СИЗ), организация мест со сниженной тепловой нагрузкой, регламентированный режим работы, акклиматизация сотрудников, контроль микроклиматических параметров, построение температурных карт рудников и др. [27, 39, 55, 130]. Практика показывает, что наиболее эффективными в вопросе противодействия нагревающему микроклимату являются СКВ и организация мест со сниженной тепловой нагрузкой. Первое решение позволяет осуществить нормализацию микроклимата в зоне ведения работ, а второе – снизить значение среднесменного показателя температурного стресса за счет грамотной организации интервалов работы и отдыха [114, 120]. Задача управления теплом требует технико-экономического анализа альтернатив, который осложняется нестационарностью производственных процессов, наличием факторов, оказывающих периодическое влияние на микроклимат (тепловыделения от движущегося автотранспорта) и постоянным смещением зон ведения работ. В этом случае оценка уровня воздействия теплового фактора является проблематичной. Потребность в определении уровня теплового воздействия на работников, диктует необходимость решения проблемы непредсказуемости, т.к. важно знать, какие факторы оказывают влияние на тепловой режим в конкретном месте пребывания, какие значения они имеют и какой вклад вносят в итоговое значение показателя тепловой нагрузки.

## 1.6 Цель и задачи исследования

На основании проведенного анализа проблемы и существующих способов ее решения сформулирована следующая цель исследования — обеспечение безопасного ведения горных работ в условиях высоких температур воздуха длинных очистных забоев с учетом распределения микроклиматических параметров воздуха и режимов работы оборудования.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующего ряда задач:

1. Теоретические и экспериментальные исследования характера тепловыделений от оборудования подготовительных и очистных выработок калийных рудников.
2. Разработка математических моделей, описывающих нестационарный характер нагрева и охлаждения оборудования в горных выработках.
3. Проведение экспериментальных исследований динамики распределения микроклиматических параметров воздуха в длинных очистных забоях калийных рудников и в сопряженных с ними выработках.
4. Исследование особенностей формирования микроклиматических условий в добычные и ремонтные смены.
5. Разработка динамической модели распределения микроклиматических параметров в длинных очистных забоях с учетом нестационарной работы источников тепловыделения.
6. Разработка методического подхода к комплексированию организационных и технических мероприятий по управлению тепловым режимом подземных рабочих зон.



## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В ДЛИННОМ ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ

Температура рудничного воздуха в горных выработках зависит от множества факторов, которые по способу моделирования можно разделить на две категории – теплообмен воздуха с породным массивом и изменение его теплосодержания источниками тепла или холода. В зависимости от специфики решаемой задачи требуется различный уровень детализации факторов первой категории, от самого простого с заданием граничных условий первого, второго или третьего рода без учёта особенностей распространения тепла в массиве, до уровня максимальной сложности рассмотрением процесса теплообмена в воздухе и породном массиве в сопряжённой постановке [50]. Упрощённая постановка является корректной и имеет незначительную погрешность в предельных случаях, при малых и больших временах теплообмена. В первом случае при непродолжительном контакте горячего или холодного воздуха с породным массивом горной выработки наибольшая часть температурного напора приходится на тонкий пограничный слой воздуха, что соответствует граничному условию третьего рода с заданным коэффициентом теплоотдачи и неизменной температурой пород. При наличии теплоизоляции у горной выработки ставится граничное условие второго рода с нулевым значением потока тепла. В другом предельном случае, когда по прошествии длительного времени при почти стационарном распределении температур воздуха по длине выработок температурные изменения проникают глубоко в массив, допустимо граничное условие первого рода, основанное на равенстве температур воздуха и крепи. Если специфика задачи не соответствует предельным случаям, то решаться она должна либо в сопряжённой постановке, либо с граничным условием 4-го рода, которое также подразумевает моделирование теплопереноса, как в воздухе, так и в массиве. Допустимо также использование упрощённой модели «коэффициента нестационарного теплообмена», в которой меняющаяся интенсивность отвода тепла из воздушного потока отражена в этом модельном коэффициенте, как функция времени [52]. Для осуществления прогноза температурных изменений вентиляционного воздуха при его движении по горным выработкам необходимо знать также факторы второй категории, связанные с источниками тепла и холода. После подачи воздуха в рудник через воздухоподающие стволы его температура начинает изменяться, как за счёт теплообмена с породой, так и в результате взаимодействия с источниками тепла и холода естественного и искусственного происхождения. Естественными процессами являются разогрев и охлаждение воздуха в стволах в результате его гидростатического сжатия и расширения, изменение температуры воздуха при испарении и конденсации влаги,

выделение тепла при окислительных процессах и горении. К основным искусственным источникам тепла и холода относятся установки нагрева и кондиционирования воздуха, а также выделяющее тепло горное оборудование.

Учет техногенных источников тепловыделения является важным, в случае если они расположены по направлению движения воздуха к рабочим зонам, поскольку их работа может оказывать влияние на температуру воздуха, поступающего для проветривания. Обычно, эта температура определяется естественной температурой массива горных пород, к которой она приближается вследствие процесса теплообмена. Наличие локальных источников тепловыделения при этом, как правило, не оказывает влияния, так как локальный нагрев воздуха нивелируется процессом теплообмена. Но ситуация меняется при наличии распределенных источников тепловыделения таких как конвейерные линии и оборудование, входящее в состав участка энергопоезда.

Также следует отметить, что на сегодняшний день исследования теплообменных процессов в подземных выработках осуществляются, как правило, с использованием математических моделей тепло-, влаго- и воздухораспределения в рудничной вентиляционной сети [18, 53, 83, 110]. Существующие модели [37, 56, 119, 125, 128, 135] тепловыделения от техногенных источников (горные машины и оборудование) только в режимах «работы» и «останова». При этом для первого режима тепловыделения принимаются постоянными, а в случае второго режима — тождественно равными нулю. Таким образом, данные модели, фактически, описывают стационарные аэрологические процессы в системе горных выработок.

В действительности горное оборудование обладает конечной теплоемкостью и при работе испытывает нагрев (как и окружающий массив). После его отключения происходят продолжительные тепловыделения от нагретых тел, уменьшающиеся с течением времени от максимальных значений, соответствующих штатному режиму работы, вплоть до нуля (при условии достаточно длительной остановки). Другими словами, оборудованию свойственна тепловая инерция [46]. Ее учет важен для корректного моделирования аэрологических процессов в рудничных вентиляционных сетях.

Для разработки корректной модели теплообменных процессов в горных выработках, способной учитывать нестационарную природу техногенных источников тепловыделений, требуется проведение натурных исследований переходных тепловых режимов в процессе отключения электрооборудования. Такие исследования позволят определить степень влияния параметров воздуха, поступающего на проветривание, и

параметров работы оборудования на температуру воздуха в выработке с течением времени.

Результаты приведенных ниже экспериментальных измерений указывают на существенное влияние данных факторов на температуру воздуха.

Все результаты, полученные в данной главе, опубликованы в работах [62, 136].

## **2.1 Исследования величины тепловыделений от конвейера**

В разделе представлены результаты эксперимента, направленного на установление величины нагрева воздуха при работающем конвейере. Разработана модель сопряженного нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород при работе конвейера. Указанная модель позволяет учитывать нестационарные аэрологические процессы в системе горных выработок обусловленные изменением режимов работы протяженных источников тепловыделений. А также обоснован способ распределения воздуха между транспортными и конвейерными штреками, обеспечивающий снижение результирующей температуры воздуха.

## **2.2 Экспериментальные исследования величины нагрева при работающем конвейере**

Исследования выполнены в условиях калийных рудников ОАО «Беларуськалий». Схематично объект исследования представлен на рисунке 2.1.

Свежая струя воздуха поступает по транспортному и конвейерному штрекам к длинному очистному забою. Длина выработок может достигать 5000 метров, конвейерный штрек при этом оборудован ленточными конвейерами, по которым транспортируется добываемая руда. В ходе измерений фиксировались общий расход воздуха, подаваемый по выработкам, естественная температура горных пород (точка 1) и температура воздуха перед участком энергопоезда (точка 2). В таблице 2.1 представлены результаты экспериментальных измерений, разница температур между точками 1 и 2 обусловлена тепловыделениями от конвейеров.

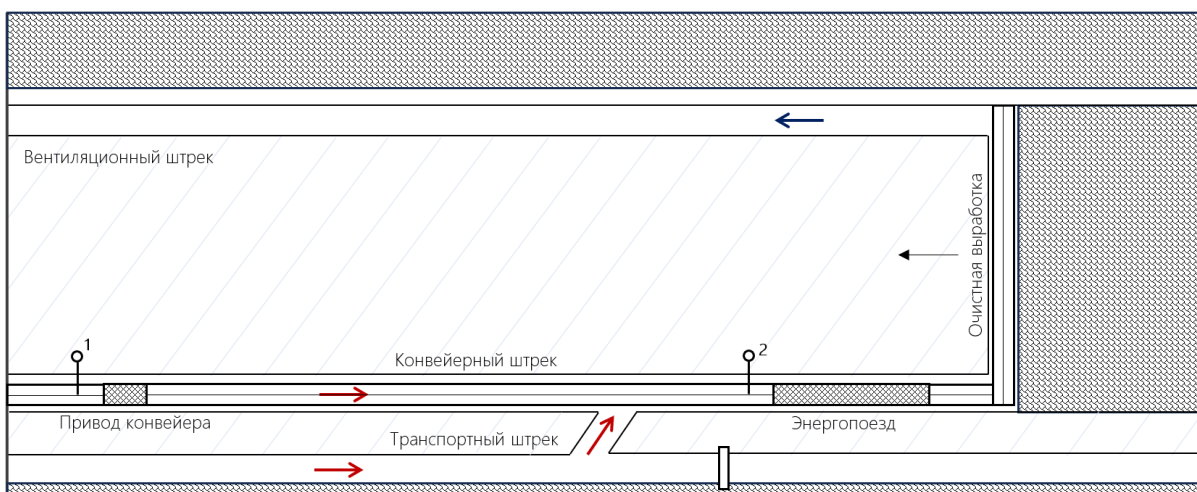


Рисунок 2.1 — Схематичное изображение подачи воздуха по конвейерному и транспортному штрекам до длинного очистного забоя

Таблица 2.1 — Измерения температуры воздуха в конце штрека

Название комплекса	Высотная отметка, м	Расход воздуха (по обоим штрекам), м <sup>3</sup> /с	Температура массива горных пород (точка 1), °С	Температура воздуха перед энергопоездом (точка 2), °С	Величина нагрева от конвейера, °С
Лава № 14	-427	2,0	17,1	20,2	3,1
Лава № 101	-643	3,1	18,8	23,1	4,3
Лава № 104	-588	4,6	18,4	22,5	4,1
Лава 1с-1	-478	2,9	16,4	19,4	3,0
Лава 2н-1	-518	5,1	17,0	21,8	4,8
Лава 2н-2	-507	3,1	16,8	24	7,2
Лава 3в-1	-498	7,2	16,7	20,2	3,5
Лава 4в-1	-517	7,5	16,9	24,1	7,2
Лава 5в-1	-600	7,5	18,0	22,1	4,1
Лава 6в-1	-509	2,6	16,8	22,9	6,1
Лава 2-3	-581	5,0	19,0	24,8	5,8
Лава 9-в-3	-818	2,3	20,8	26,0	5,2
Лава 13-н-5	-748	5,5	19,9	25,4	5,5
Лава 4-в-5	-729	3,9	19,6	22,8	3,2
Лава 4-7	-668	9,1	20,7	24,3	3,6
Лава 4-1	-687	8,1	21,0	25,3	4,3
Лава 4-2	-721	4,9	21,6	28,0	6,4
Лава 4-5	-676	6,1	20,8	23,7	2,9
Лава 4-3	-689	5,3	21,0	25,8	4,8
Лава 4-9-в	-733	3,8	19,7	23,7	4,0
Лава 4-13-в	-670	2,0	18,9	24,4	5,5
Лава 4-12	-645	2,1	18,6	23,3	4,7
Лава 4-11	-733	3,0	19,7	27,1	7,4
Лава 4-10-в	-771	4,6	20,2	25,1	4,9

Характер распределения тепловыделения от конвейера при этом является практически равномерным по длине выработок, так как вся энергия, потребляемая приводом, диссипируется по длине штрека на преодоление сил трения.

Кроме того, на основе наблюдений установлено, что конвейерные линии в среднем работают около половины времени смены, что подразумевает необходимость учета эффективного времени работы источника тепловыделения при проведении расчетов.

Таким образом, конечная температура воздуха при его движении по конвейерному штреку формируется за счет воздействия двух факторов: теплообмена воздуха с массивом горных пород и тепловыделений от распределенных источников.

### **2.3 Математическая модель изменения температуры воздуха при его движении по конвейерному штреку**

Ниже представлена модель изменения температуры воздуха при его движении по конвейерному штреку, конвейерная лента которого считается равномерно распределённым по длине выработки источником тепла. Время эксплуатации выработки предполагается произвольным, поэтому упрощённая постановка задачи теплообмена без рассмотрения процесса распространения тепла в массиве не приемлема, поскольку не позволяет сделать точную оценку изменения интенсивности отвода тепла в породный массив. Широко используемый при решении задач рудничной теплофизики метод расчёта на основе использования модельного коэффициента нестационарного теплообмена [97] в данном случае не приемлем, т.к. имеет ограниченный временной диапазон применимости и приводит к получению тем более завышенных результатов в отношении интенсивности отвода тепла, чем больше выход за пределы диапазона. Зависимость значения коэффициента теплоотдачи между рудничным воздухом и породным массивом горных выработок от их геометрических параметров и скорости хорошо изучена [19], поэтому сопряжённая постановка задачи теплообмена может быть сведена к постановке граничного условия 4-го рода без моделирования теплопередачи через пограничный слой [46].

Решение поставленной задачи осуществляется на основе модели, представленной в [49], так как данная модель теплообмена в отличие от численных [15, 110] и приближенных аналитических [106, 121, 125, 127, 131] не имеет сильных допущений относительно ограничения расчетной области или использования приближенных решений.

Задача теплообмена рудничного воздуха с породным массивом с распределёнными по длине горизонтальной выработки источниками тепла моделируется в предположении цилиндрической симметрии выработки с двумя пространственными координатами – радиальной  $r$  (м) и горизонтальной  $x$  (м) [49]. Значение объёмной

теплоёмкости  $c_m$  (Дж/(м<sup>3</sup>·°С)) и температуропроводности  $\chi_m$  (м<sup>2</sup>/с) неограниченного породного массива считаются постоянными. В устье выработки ( $x = 0$ ) радиусом  $r_0$  (м) подаётся воздух с объёмной теплоёмкостью  $c_a$  (Дж/(м<sup>3</sup>·°С)) и постоянной температурой  $T_{a0}$  (°С). В предположении незначительных температурных изменений плотности воздуха  $\rho_a$  (кг/м<sup>3</sup>), а также скорости его движения  $v$  (м/с) полагаются постоянными и соответствующими средней плотности воздуха. Считается, что в начальный момент времени до включения источника тепла весь массив со всем воздухом в выработке при  $x > 0$  имеют температуру «непотревоженного» массива  $T_{m\infty}$  (°С). Исходя из того, что турбулентная теплопроводность воздуха намного больше, чем молекулярная теплопроводность породы, можно принять, что температура воздуха по сечению выработки выравнивается мгновенно. С другой стороны, на фоне конвективного переноса тепла диффузионная теплопроводность по ходу движения воздуха незначительна, и потому продольную теплопроводность в воздухе можно положить равной нулю, т.е. принять, что перенос тепла вдоль выработки осуществляется только движением воздуха. Аналогичное упрощение делается в связи с тем, что скорость движения воздуха намного больше скорости распространения тепла в массиве, т.е. перепады температур по оси  $z$  и в радиальном направлении в массиве будут разного порядка: по  $x$  – десятки метров, по  $r$  - десятки сантиметров. Это даёт возможность пренебречь распространением тепла в направлении оси  $x$  в массиве. Таким образом, считается, что и в массиве, и в воздухе имеет место только радиальная теплопроводность, продольная же теплопроводность считается не существенной и в модели не учитывается.

Для упрощения математической записи задачи вводятся безразмерные координаты:

$$\begin{aligned} r &= \frac{r}{r_0}, \\ x &= \frac{x}{r_0}, \\ T_a &= \frac{T_a(x, t)}{T_{m\infty}}, \\ T_m &= \frac{T_m(r, x, t)}{T_{m\infty}}, \\ t &= \frac{t \cdot \chi_m}{r_0^2}. \end{aligned}$$

Уравнение теплопроводности в массиве в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T_r}{\partial r} \right). \quad (2.1)$$

Плотность потока тепла из воздуха в массив  $j_a$  (Дж/(м<sup>2</sup>·с)) должна быть равна плотности потока тепла  $j_m$  (Дж/(м<sup>2</sup>·с)) от границы с воздухом  $r = 1$  в массив. Необходимо составить уравнение баланса теплосодержания  $Q_a$  (Дж) в элементарном объёме воздуха  $\Delta V$  (м<sup>3</sup>) сечением  $S$  (м<sup>2</sup>) и толщиной  $\Delta x$  (м) с поверхностью теплообмена этого объёма  $\Delta F$  (м<sup>2</sup>).

Поскольку теплопроводность воздуха в радиальном направлении в модели принята бесконечной, то баланс теплосодержания сводится к равенству общего потока тепла за пределы этой поверхности и изменения теплосодержания в данном объёме воздуха (в размерном виде):

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_a}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial Q_a}{\partial x} &= j_m \cdot \Delta F + w \cdot \Delta V, \\ \Delta F &= 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \Delta x, \\ \Delta V &= S \cdot \Delta x, \\ S &= \pi \cdot r_0^2,\end{aligned}\tag{2.2}$$

где  $w$  – удельное тепловыделение в объёме выработки, Дж/(м<sup>3</sup>·с).

Уравнение (2.2) отличается от модели, изложенной в [49] наличием дополнительного слагаемого  $w$ , задающим интенсивность выделения тепла от равномерно распределённого по длине выработки источника (конвейерной ленты). Аналогичный подход к моделированию теплообмена был использован в работе [41] при описании нагрева воздуха в результате его гидростатического сжатия при движении по воздухоподающему стволу.

С учетом того, что

$$\begin{aligned}dQ_a &= c_a \cdot \Delta V \cdot dT_a, \\ j_m &= -\chi_m \cdot c_m \cdot b \cdot \left[ \frac{dT_m}{dr} \right]_{r=1}.\end{aligned}$$

Условие на границе воздуха с массивом в безразмерной форме принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}a \cdot \frac{\partial T_a}{\partial x} + \frac{\partial T_a}{\partial t} &= b \cdot \left[ \frac{\partial T_m}{\partial x} \right]_{r=1} + \bar{w}, \\ a &= \frac{v \cdot r_0}{\chi_m}, \\ b &= \frac{2 \cdot c_m}{c_a}, \\ \bar{w} &= \frac{w \cdot r_0^2}{\chi_m \cdot c_a}.\end{aligned}\tag{2.3}$$

Второе граничное условие содержит информацию о величине коэффициента теплоотдачи и определяет разность температур воздуха и массива на границе:

$$a \frac{b}{c} \cdot ([T_m]_{r=1} - T_a) = \left[ \frac{\partial T_m}{\partial x} \right]_{r=1}, \quad (2.4)$$

$$c = \frac{2 \cdot \alpha \cdot r_0}{c_a \cdot \chi_m}.$$

Поскольку условие (2.3) содержит производную по координате, оно должно быть еще дополнено значением температуры воздуха в начале выработки, таким образом:

$$[T_a(x, t)]_{x=0} = T_{a0}. \quad (2.5)$$

Вся система уравнений дополняется начальными условиями для

$$[T_a(x, t)]_{t=0} = 0, \quad (2.6)$$

$$[T_m(r, x, t)]_{t=0} = 0.$$

Нестационарная цилиндрическая задача (2.1-2.6) решается с помощью преобразований Лапласа [78]. Функции температур воздуха и массива ставятся в соответствие их изображениям

$$\tau(r, p, x) = \int_0^{+\infty} T(r, t, x) \cdot e^{-pt} \cdot dt,$$

где  $p$  – комплексный параметр с областью определения  $Re(p) > 0$ .

Уравнение в частных производных (2.1) для оригинала  $T_m$  сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению для изображения  $\tau_m$ .

$$\frac{\partial^2 \tau_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_m}{\partial r} - p \cdot \tau_m = 0, \quad (2.7)$$

со следующими граничными и начальными условиями:

$$\left[ a \frac{\partial \tau_a}{\partial x} + p \cdot \tau_a \right]_{r=1} = \left[ b \cdot \frac{\partial \tau_m}{\partial r} \right]_{r=1} + \frac{\bar{w}}{p}, \quad (2.8)$$

$$\left[ \frac{c}{b} \cdot (\tau_m - \tau_a) \right]_{r=1} = \left[ \frac{\partial \tau_m}{\partial r} \right]_{r=1}, \quad (2.9)$$

$$\tau_a(r = 1, p, 0) = \int_0^{+\infty} T_{a0} \cdot e^{-pt} \cdot dt = \frac{T_{a0}}{p}, \quad (2.10)$$

полученными из условий (2.3-2.5) соответственно.

Уравнение (2.7) является уравнением Бесселя, решение которого можно представить в виде:

$$\tau_m(r, p, x) = f(x) \cdot J_0(r \cdot \sqrt{p}) + g(x) \cdot N_0(r \cdot \sqrt{-p}), \quad (2.11)$$



где  $J_0$  и  $N_0$  – функции Бесселя и Неймана нулевого порядка, коэффициенты  $f(x)$  и  $g(x)$  подлежат определению. Связь между ними задает условие на бесконечности:

$$[\tau_m]_{r \rightarrow \infty} = \int_0^{+\infty} T_m(r \rightarrow \infty, t, x) \cdot e^{-pt} \cdot dt = 0.$$

Соотношение между коэффициентами  $f(x)$  и  $g(x)$  должно быть таковым, чтобы при  $r \rightarrow \infty$  и  $\tau_m \rightarrow 0$ :

$$\frac{g(x)}{f(x)} = - \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{J_0(r \cdot \sqrt{p})}{N_0(r \cdot \sqrt{-p})} = -k. \quad (2.12)$$

Исходя из асимптотических разложений функций  $J_0$  и  $N_0$  при  $r \rightarrow \infty$  [9], можно заключить, что в (2.12) при  $k = -i$  при  $Im(\sqrt{-p}) > 0$  и  $k = i$  при  $Im(\sqrt{-p}) < 0$ . Функция  $\sqrt{\zeta}$ , где  $\zeta$  – комплексное число, является двузначной, а при расчете должно фигурировать только одно ее значение. Это значение можно конкретизировать условием  $Re(\sqrt{\zeta}) \geq 0$ . После представления  $\zeta$  в экспоненциальном виде  $\zeta = |\zeta|e^{i \cdot \arg(\zeta)}$  несложно убедиться, что условие  $Im(\sqrt{-p}) > 0$  соответствует условию  $Im(p) < 0$  и наоборот, условие  $Im(\sqrt{-p}) < 0$  соответствует условию  $Im(p) > 0$ .

Преобразования Лапласа позволяют разделить переменные  $x$  и  $r$  и понизить размерность задачи. Теперь, если положить  $r = 1$ , остается только информация о зависимости по  $x$  и, в дальнейшем, после перехода к оригиналу, от  $t$ . Далее координата  $r$  опускается, что означает  $r = 1$ . После подстановки (2.11) в (2.9) коэффициент  $f(x)$  с учетом (2.7) выражается через  $\tau_a$ :

$$f(x) = \frac{\tau_a}{(J_0(\sqrt{p}) - k \cdot N_0(\sqrt{-p})) + \frac{b}{c} \cdot \sqrt{-p} \cdot (J_1(\sqrt{p}) - k \cdot N_1(\sqrt{-p}))}. \quad (2.13)$$

Теперь, после подстановок (2.13) в (2.11) и (2.11) в (2.8), получается дифференциальное уравнение с одной неизвестной функцией  $\tau_a$ :

$$\frac{\partial \tau_a}{\partial x} + \frac{\omega}{a} \cdot \tau_a = \frac{\bar{w}}{p \cdot a}, \quad (2.14)$$

$$\omega(p) = p + \frac{1}{\frac{1}{\varphi(p)} + \frac{1}{c}}$$

$$\varphi(p) = b \cdot \sqrt{-p} \cdot \frac{J_1(\sqrt{p}) - k \cdot N_1(\sqrt{-p})}{J_0(\sqrt{p}) - k \cdot N_0(\sqrt{-p})}$$

Решение (2.14) с учетом (2.10) дает зависимость

$$\tau_a = \frac{\bar{w}}{\varphi(p)} + \left( T_{a0} - \frac{\bar{w}}{\varphi(p)} \right) e^{-\frac{\omega(p) \cdot x}{a}}, \quad (2.15)$$

которая совпадает с полученной [49] формулой для теплообмена без источников тепловыделения. Восстановление оригинала

$$T_a(x, t) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot i} \cdot \int_{x-i \cdot \infty}^{x+i \cdot \infty} e^{pt} \cdot \tau_a(p, x) \cdot dp, \quad (2.16)$$

где интегрирование ведется вдоль любой прямой с вещественной координатой  $x$ , большей показателя роста функции  $T$ .

Для определения коэффициента теплоотдачи, определяющей параметры  $a$  и  $\omega$  может быть использована зависимость [19]

$$\alpha = 3,4 \frac{v^{0,8}}{(2 \cdot r_0)^{0,2}}.$$

Данная зависимость получена для цилиндрических каналов при течении воздуха при числах Рейнольдса свыше 104.

Полученные формулы (2.15 - 2.16) позволяют рассчитывать температуру воздуха как функцию времени и продольной координаты.

### **2.3.1 Оптимизация распределения заданного расхода воздуха, подаваемого по конвейерному и транспортному штрекам по критерию минимизации температуры воздуха**

В соответствии с разработанной математической моделью теплообмена воздуха в горной выработке с распределенными источниками выделения тепла была проведена оценка нагрева воздуха движущейся конвейерной лентой спустя длительное время (через 1 год) эксплуатации выработки. Целью расчёта была также оптимизация распределения заданного расхода воздуха по двум параллельным выработкам, конвейерному и транспортному штрекам, по критериям минимизации температуры воздуха смешанного воздуха на выходе и не превышения максимально допустимого значения температуры воздуха в конвейерном штреке. В расчете в размерном виде принимались следующие параметры. Сечение двух параллельных штреков принимались  $11 \text{ м}^2$ , длина 3000 метров. Общий расход подаваемого воздуха на проветривание столба (по двум штрекам)  $10 \text{ м}^3/\text{с}$ . Средняя интенсивность тепловыделения в конвейерном штреке  $100 \text{ Вт/м}$  с учетом циклической работы конвейера, учитывающей, что конвейер работает только 50 % от общего времени смены. Температура породного массива составляет  $+21^\circ\text{C}$ , начальная температура воздуха, поступающего на проветривание столба лавы, равна  $+18^\circ\text{C}$ . Кроме того, при решении задачи принято ограничение – температура воздуха в конвейерном штреке не должна превышать  $+40^\circ\text{C}$ , т.е. такую,

которая не допускает пребывания людей в выработке, но еще делает возможным работу электрооборудования конвейера.

В таблице 2.2 приведены результаты расчета итоговой температуры воздуха после смешивания потоков при различных распределениях воздуха по штрекам.

Таблица 2.2 — Зависимость значений температуры воздуха на выходе из конвейерного штрека и смеси в зависимости от распределения воздуха по выработкам

Доля воздуха по конвейерному штреку	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Конвейерный штрек, °С	48.0	38.0	34.5	32.5	31.2	30.3	29.6	29.0	28.6	28.2
Смесь, °С	21.0	22.0	23.0	23.8	24.6	25.4	26.1	26.8	27.5	28.2

Из представленных в таблице 2.2 расчётных данных следует, что оптимальным соотношением распределения воздуха по штрекам в заданных условиях является 20 % воздуха по конвейерному штреку (2 м<sup>3</sup>/с в конвейерном и 8 м<sup>3</sup>/с в транспортном штреках). При этом соотношении достигается минимальная температура смешанного воздуха +22°С, а также не происходит превышения предельной температуры воздуха в конвейерном штреке.

Следует заметить, что принятое в расчёте время теплообмена (1 год) с начала эксплуатации конвейера не является большим в смысле достижения максимально возможной температуры  $T_{am}$  (°С) на выходе из конвейерного штрека, которая по истечении бесконечно большого времени должно соответствовать адиабатическому решению

$$T_{am} = T_{a0} + \frac{w \cdot L \cdot S}{c_v \cdot Q_{a1}} \quad (2.17)$$

При заданных параметрах задачи, когда весь воздух идёт по конвейерному штреку, его температура на бесконечно большом временном промежутке будет стремиться к +43°С, что значительно выше полученного в расчёте значения температуры воздуха на выходе +28.2°С. Это означает, что температура в выработке со временем будет повышаться, правда, скорость её увеличения с каждым годом будет уменьшаться так, как это представлено на рисунке 2.2. Это справедливо для различных расходов воздуха ( $q$ ) и температур породного массива ( $T_m$ ).

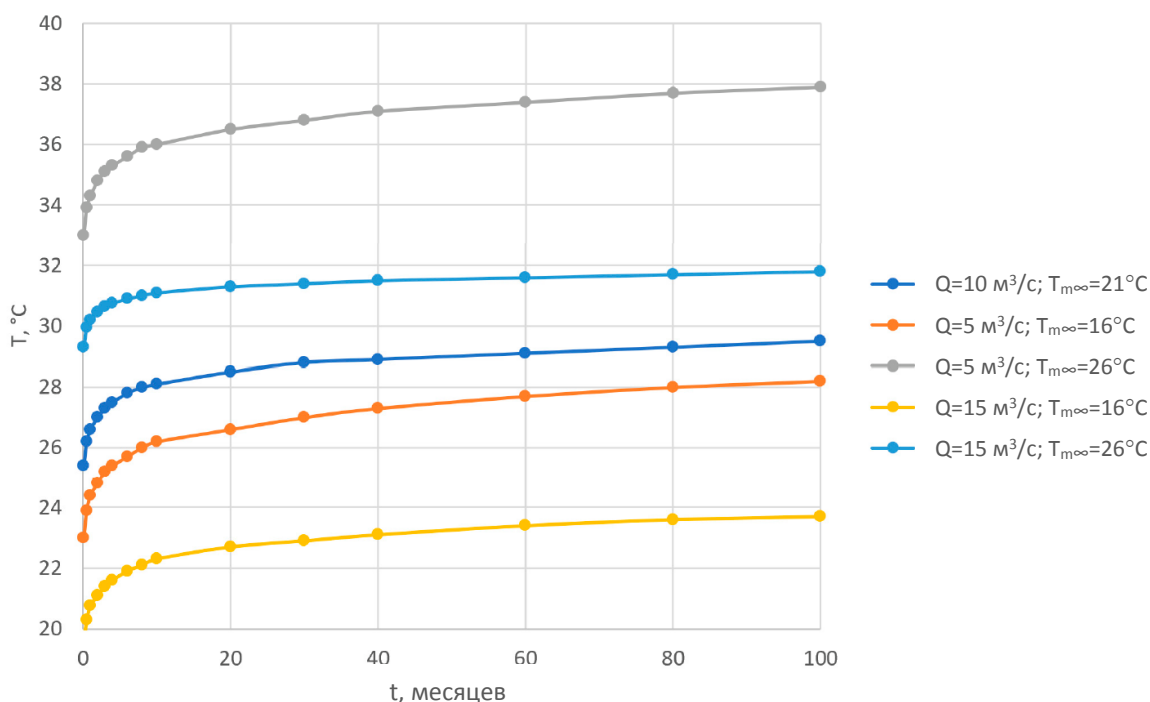


Рисунок 2.2 — Температура воздуха на выходе из конвейерного штрека в зависимости от времени

Судя по расчётным данным, представленным на рисунке даже по истечении 100 месяцев с начала теплообмена, температура воздуха на выходе не превысит +30°C, что приводит к выводу о том, что в реальных временных интервалах теплообменный процесс является нестационарным, температура растёт с убывающей скоростью, и асимптотическое решение не будет достигнуто никогда. В первый месяц с начала теплообмена температура воздуха на выходе из конвейерного штрека составляет +27°C, к концу года увеличивается до +28°C, через 4 года – до +29°C, через 8 лет возрастает ещё на половину градуса и т.д.

#### 2.4 Исследования величины тепловыделений от энергопоезда

Помимо конвейерных линий значительное влияние на температуру воздуха в длинных очистных забоях оказывает оборудование, входящее в состав участка энергопоезда. При этом величина тепловыделений напрямую зависит от режима работы оборудования. В разделе описаны исследования величины нагрева и охлаждения воздуха при разных режимах работы энергопоезда, а также разработана математическая модель конвективного переноса теплоты в лаве с учетом теплообмена с окружающими источниками.

#### 2.4.1 Экспериментальные исследования величины нагрева и охлаждения воздуха при разных режимах работы энергопоезда

В разделе представлены результаты исследований величины нагрева и охлаждения воздуха при разных режимах работы энергопоезда.

В рамках работы исследован столб лавы №4-1 рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий». Столб лавы обрабатывается обратным порядком и включает в себя: два штрека (один конвейерный и один вентиляционный) и очистную выработку — лаву. Для проветривания столба свежая струя воздуха из главного транспортного штрека направления поступает в конвейерный штрек лавы и затем в очистную выработку. Исходящая из лавы струя воздуха удаляется по вентиляционным штрекам лавы на вентиляционный штрек направления рудника. Принципиальная схема проветривания лавы представлена на рисунке 2.3.

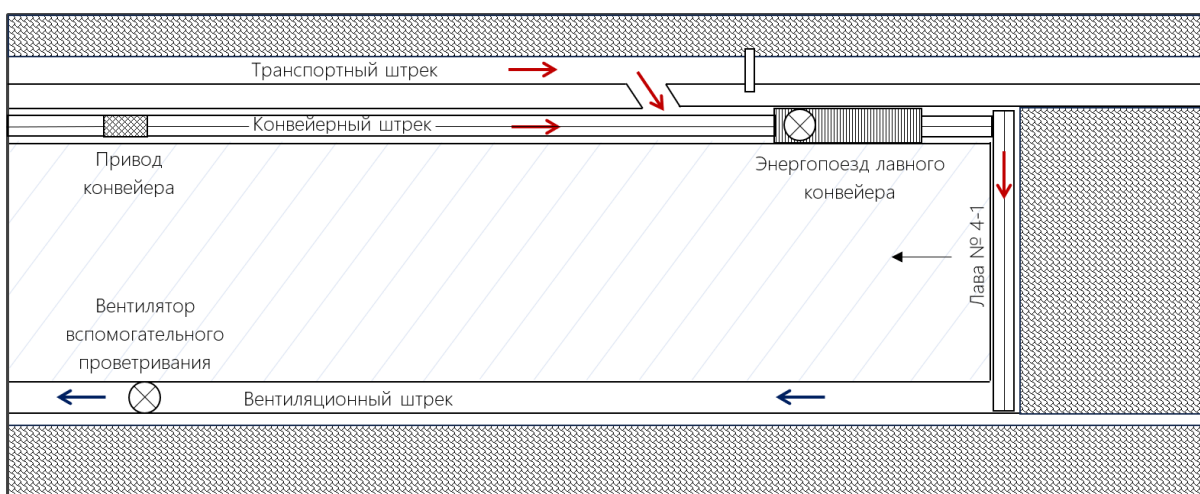


Рисунок 2.3 — Принципиальная схема проветривания лавы №4-1

В проветривании рабочей зоны лавы №4-1 участвуют: вентиляторные установки главного проветривания, вентилятор вспомогательного проветривания ВМ-12, расположенный у основания столба лавы, а также вентилятор энергопоезда комбайна.

Вентилятор энергопоезда комбайна Korfmann выполняет функцию распределения воздуха между конвейерными и транспортными штреками, а также способствует увеличению объема воздуха в лаве. Он включается одновременно с началом работы комбайнового комплекса и отключается спустя 5 – 10 минут после прекращения его работы. В свою очередь, главные вентиляторные установки и вентилятор ВМ-12 находятся в работе постоянно и не зависят от режима работы лавы.

Необходимо пояснить, что под рабочей зоной лавы понимается сама очистная выработка, а также примыкающая к ней часть конвейерного штрека, в которой располагается энергопоезд комбайнового комплекса, поскольку в этих выработках

находится персонал, осуществляющий добычу руды, и происходит обслуживание оборудования.

Комбайновый комплекс лавы включает в себя следующие компоненты: очистной комбайн, забойный скребковый конвейер, механизированную крепь очистной выработки, крепь сопряжения и энергопоезд (станция управления, насосные станции и насосная установка). Расположение оборудования в лаве №4-1 изображено на рисунке 2.4.

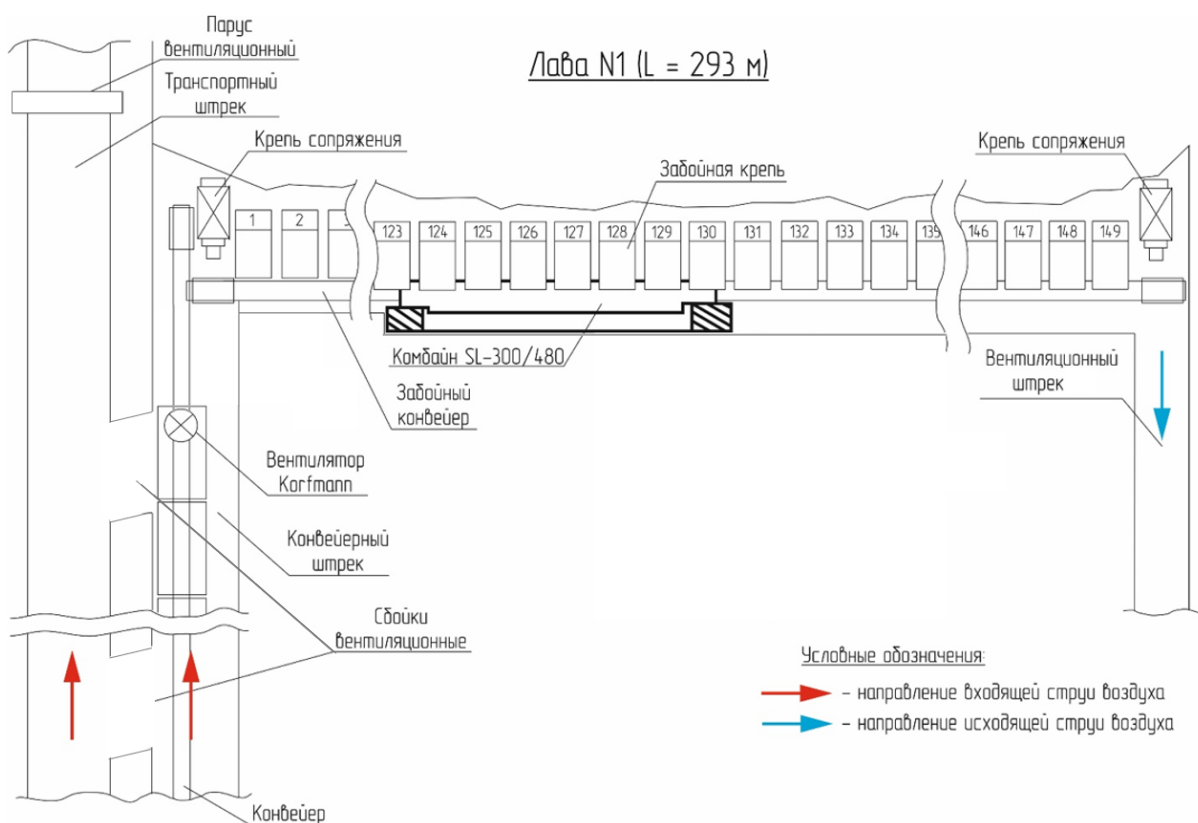


Рисунок 2.4 — Расположение оборудования в лаве №4-1

На данный момент стандартный график работы на рудниках ОАО "Беларуськалий" предусматривает проведение трех добычных смен и одной ремонтной смены ежедневно. Продолжительность каждой смены составляет 6 часов. Зачастую для обслуживания оборудования комбайнового комплекса между добычными сменами не требуется полноценной ремонтной смены, которая заменяется кратковременной ревизией оборудования с остановкой на 2 – 3 часа.

В рамках работы измерялись показания относительной влажности, температуры воздуха по сухому термометру, а также расход воздуха. Все измерения проводились в двух режимах работы лавы — добычном и ремонтном. Добычным режимом работы характеризуется работающими комбайновым комплексом и конвейерными линиями, что приводит к значительным тепловыделениям в подготовительных и очистных горных выработках. В ремонтном режиме тепловыделяющее оборудование отключено.

Измерение показателей микроклимата проводилось непрерывно в течение всей рабочей смены.

Для достижения поставленной цели в процессе выполнения работы были решены следующие задачи:

- 1) определено влияние вентилятора энергопоезда на скорость остывания оборудования;
- 2) определено изменение температуры воздуха вблизи оборудования с течением времени при его работе и остановках;
- 3) определены распределения температуры воздуха по длине лавы с течением времени.

Экспериментальное исследование лавы № 4–1 проводилось при переходе ее от добычной смены к ремонтной для разных режимов проветривания лавы.

Предполагалось, что главные вентиляторные установки в период проведения исследования не способствовали изменению с течением времени количества воздуха, подаваемого на проветривание столба лавы.

В ходе эксперимента исследовались четыре режима проветривания лавы:

- 1) режим № 1 — расход воздуха в лаве для добычной и ремонтной смен постоянный;
- 2) режим № 2 — расход воздуха в лаве снижается сразу после завершения добычной смены и отключения оборудования;
- 3) режим № 3 — расход воздуха в лаве после завершения добычной смены первоначально остается прежним, однако через некоторое время значительно снижается;
- 4) режим № 4 — постепенное снижение расхода воздуха в лаве при наступлении ремонтной смены.

Измерения температуры воздуха осуществлялись непрерывно температурно-влажностными датчиками Kestrel, установленными в районе 4-ой и 124-ей секций механизированной крепи, и периодически контролировались ручными инструментальными замерами с помощью термовлагомера Fluke 971. Выбор названных секций обусловлен отсутствием прямого воздействия на них теплового потока от энергопоезда и, в то же время, показательностью замеров, обеспечивающих понимание, как меняется температура воздуха при прохождении лавы. Датчики устанавливались на механизированной крепи под кровлей выработки на высоте 2,0 – 2,2 м.

Также при помощи инфракрасного термометра (пирометра) Fluke 568 измерялись температуры груди забоя лавы и поверхности различных элементов оборудования,

размещенного в лаве и конвейерном штреке. Измерение скорости воздушной струи производилось анемометром АПР-2. Измерение поперечного сечения горных выработок осуществлялось лазерным дальномером Leica Disto D3. Объемный расход воздуха вычислялся как произведение измеренных скорости воздуха и площади поперечного сечения.

На сопряжении конвейерного штрека и лавы температура первых секций крепи достигает +34,9°C, что объясняется ее близким расположением к энергопоезду лавного комбайна. Кроме комбайнового комплекса из наиболее нагретых элементов оборудования можно выделить привод забойного конвейера, имеющий температуру от +44°C до +56°C, а также сам забойный конвейер с температурой +35,4°C в районе 4-ой секции крепи.

Результаты измерений температуры воздуха в рабочей зоне лавы № 4–1 температурно-влажностными датчиками приведены на рисунке 2.5. Показания датчиков контролировались замерах термовлагомера.

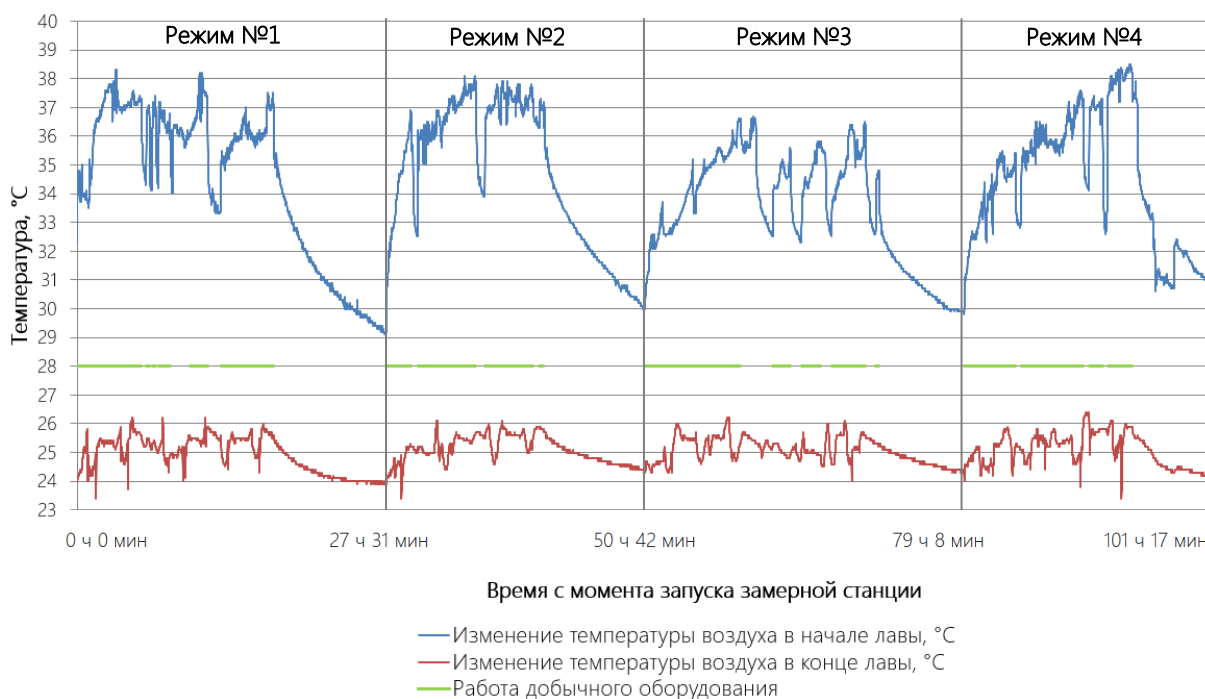


Рисунок 2.5 — Изменения температуры воздуха, регистрируемые температурно-влажностными датчиками, установленными в лаве № 4–1

На основании выполненных замеров температуры воздуха произведен расчет средних мощностей тепловыделений от оборудования энергопоезда лавного комбайна и привода лавного конвейера по формуле (кВт):

$$W = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T, \quad (2.18)$$



где  $c$  — массовая теплоемкость воздуха, принимается равной  $1,005 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\rho$  — плотность воздуха, принимается равной  $1,25 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $Q$  — расход нагреваемого объема воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $\Delta T$  — разница температур воздуха до и после взаимодействия с источником тепловыделений ( $^\circ\text{C}$ ).

Расчет мощности тепловыделений от оборудования выполнен без учета энтальпии воздуха по той причине, что водопроявления в калийных и соляных рудниках отсутствуют и влагосодержание воздуха, движущегося в лаве, является приблизительно постоянной величиной.

Обобщенные результаты температурной съемки лавы № 4–1 в районе ее сопряжения с конвейерным штреком представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Результаты температурной съемки лавы № 4 – 1

		Вентилятор энергопоезда	Q, м <sup>3</sup> /с	Длительность	T <sub>max</sub> , °C	T <sub>min</sub> , °C	W <sub>ср.</sub> , кВт	dT/dt, °C/мин	
Режим 1	Д	включен	7,46	17 ч 29 мин	38,3		98,2		
	Р	отключен	6,92	10 ч 2 мин	37,1	29,1	52,6	0,013	
Режим 2	Д	включен	7,54	14 ч 9 мин	38,1		100,7		
	Р	отключен	5,05	9 ч 2 мин	37,2	30,0	41,4	0,012	
Режим 3	Д	отключен	7,23	20 ч 51 мин	36,7		82,2		
	Р	отключен	6,45	1 ч 25 мин	34,8	31,7	54,3	0,037	0,012
	Р	отключен	4,97	6 ч 10 мин	31,7	29,8	31,2	0,005	
Режим 4	Д	отключен	7,54	14 ч 55 мин	38,5		93,2		
	Р	отключен	6,68	1 ч 0 мин	38,2	33,8	85,7	0,075	0,017
	Р	отключен	4,43	2 ч 9 мин	33,8	30,6	36,3	0,026	
	Р	отключен	6,61	4 ч 5 мин	32,4	30,7	48,1	0,007	

Условные обозначения: Д – добычная смена, Р – ремонтная смена, Q – расход воздуха, омывающего энергопоезд ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), T<sub>max</sub> – максимальная температура воздуха за представленный период времени ( $^\circ\text{C}$ ), T<sub>min</sub> – минимальная температура воздуха за представленный период времени ( $^\circ\text{C}$ ), W<sub>ср</sub> – средние тепловыделения за представленный период времени (кВт), dT/dt – средняя скорость снижения температуры воздуха за ремонтную смену ( $^\circ\text{C}/\text{мин}$ ).

При продолжительной остановке добычного оборудования в течение полноценной ремонтной смены с сохранением добычного режима проветривания столба лавы воздух в начале выработки, согласно результатам температурной съемки лавы № 4 – 1, успевает охладиться до температуры  $+29,1^\circ\text{C}$ , после чего вновь испытывает нагрев вплоть до  $+38,5^\circ\text{C}$  в добычные смены. В свою очередь, при продолжительной остановке добычного оборудования в течение полноценной ремонтной смены с уменьшением количества воздуха, подаваемого на проветривание лавы, воздух в начале выработки успевает охладиться лишь до температуры  $+30,0^\circ\text{C}$ .

В районе сопряжения лавы с конвейерным штреком температура воздуха вблизи кровли выработки на 1,3 – 1,5 °С выше, чем его температура вблизи почвы. Это объясняется:

- неравномерным нагревом потока воздуха от оборудования энергопоезда лавного комбайна;
- особенностями движения воздуха вблизи резких поворотов, которое заключается в разделении потока и образовании зон завихрения;
- разностью плотностей разных воздушных масс, поступающих в лаву, как со стороны нагретого оборудования, так и со стороны выработанного пространства.

Выравнивание температуры воздуха в плоскости поперечного сечения лавы происходит на удалении 20 м от сопряжения лавы с конвейерным штреком. Фиксирование наиболее неблагоприятных температур воздуха в лаве произведено термодатчиком, установленным в очистном забое в начале лавы в районе четвертой секции механизированной крепи. Средние температуры воздуха, проходящего через данный участок лавы, оказались ниже замеренных и в момент проведения исследования изменялись от +27,7°С до +37,1°С.

Снижение температуры воздуха в исследуемые ремонтные смены можно условно разделить на два этапа (рисунок 2.6).

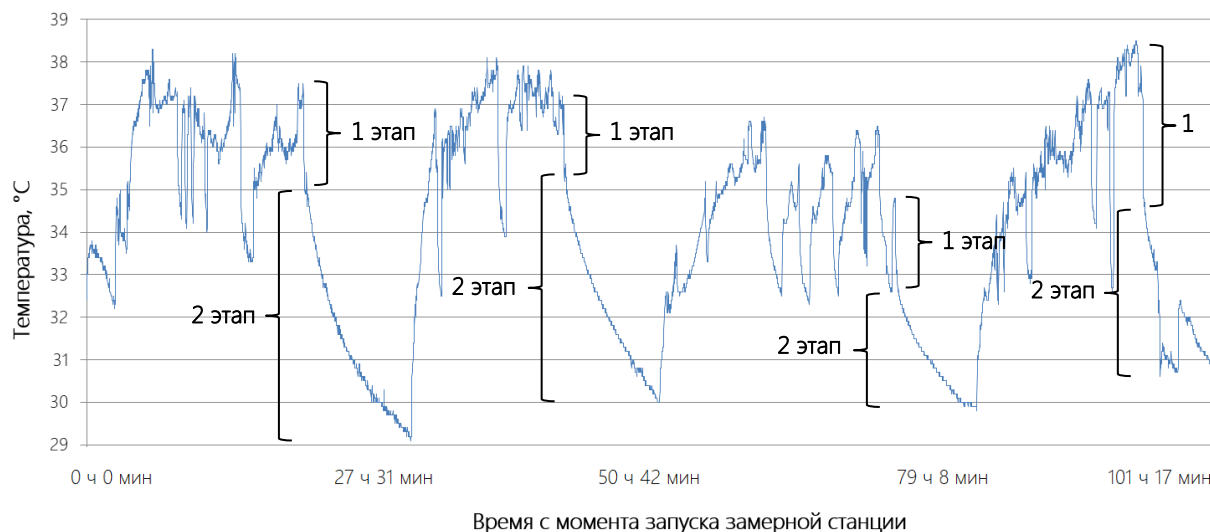


Рисунок 2.6 — Этапы снижения температуры воздуха

Первый этап характеризуется резким снижением температуры воздуха за счет достаточно быстрого уменьшения мощности тепловыделения энергопоезда лавного комбайна, вызванного, во-первых, остановкой самого комбайна, во-вторых, продолжением работы вентилятора энергопоезда, концентрирующего поток воздуха на нагретом оборудовании на протяжении 5 – 10 минут. При этом снижение температуры воздуха происходит по закону, близкому к линейному. Второй этап характеризуется

плавным снижением температуры и подчиняется экспоненциальному закону, аналогичному зависимости (2.19):

$$T = T_0 + \Delta T \cdot e^{-a \cdot t}, \quad (2.19)$$

где  $T_0$  — температура, к которой стремится воздух при охлаждении (минимальная температура, до которой охладится воздух), °С;  $\Delta T$  — максимальная разница между  $T$  и  $T_0$ , °С;  $a$  — параметр экспоненты, отвечающий за скорость снижения температуры, ч<sup>-1</sup>;  $t$  — время, ч.

Таким образом, режимы работы энергопоезда оказывают влияние на величину тепловыделений от оборудования и как следствие на температуру воздуха, поступающего в лаву.

#### **2.4.2 Математическая модель конвективного переноса теплоты в лаве с учетом теплообмена с окружающими источниками**

Для оценки интенсивности тепловых процессов, протекающих в лаве, разработана одномерная модель конвективного переноса теплоты в лаве с учетом теплообмена с окружающими источниками. С помощью модели получена формула, связывающая температуру воздуха в конце горной выработки с температурой воздуха в ее начале, температурой породного массива, расходом и геометрическими параметрами горной выработки [18]. Эта формула имеет вид:

$$T_K = T_{II} + (T_H - T_{II}) \cdot e^{-\frac{K \cdot P \cdot L}{c \cdot \rho \cdot Q}}, \quad (2.20)$$

где  $T_K$ ,  $T_H$ ,  $T_{II}$  — соответственно температуры воздуха в конце и начале горной выработки, температура непо тревоженного породного массива, °С;  $K$  — коэффициент нестационарного теплообмена, кВт/(м<sup>2</sup>·°С);  $P$ ,  $L$  — периметр и длина горной выработки, м;  $c$  — массовая теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С);  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  — расход воздуха в горной выработке, м<sup>3</sup>/с.

Параметр  $K$  в модели подобран исходя из условия максимального соответствия с данными натурных измерений. Среднее значение коэффициента нестационарного теплообмена для лавы № 1 в период проведения ее обследования составляло 4,21 Вт/(м<sup>2</sup>·°С), что говорит о значительной интенсивности процесса теплообмена между рудничным воздухом и горными породами.

Вычисленные аппроксимирующие кривые (3) для эмпирической зависимости уравнения температуры воздуха от времени для исследуемых режимов проветривания лавы № 1 представлены на рисунке 2.7.

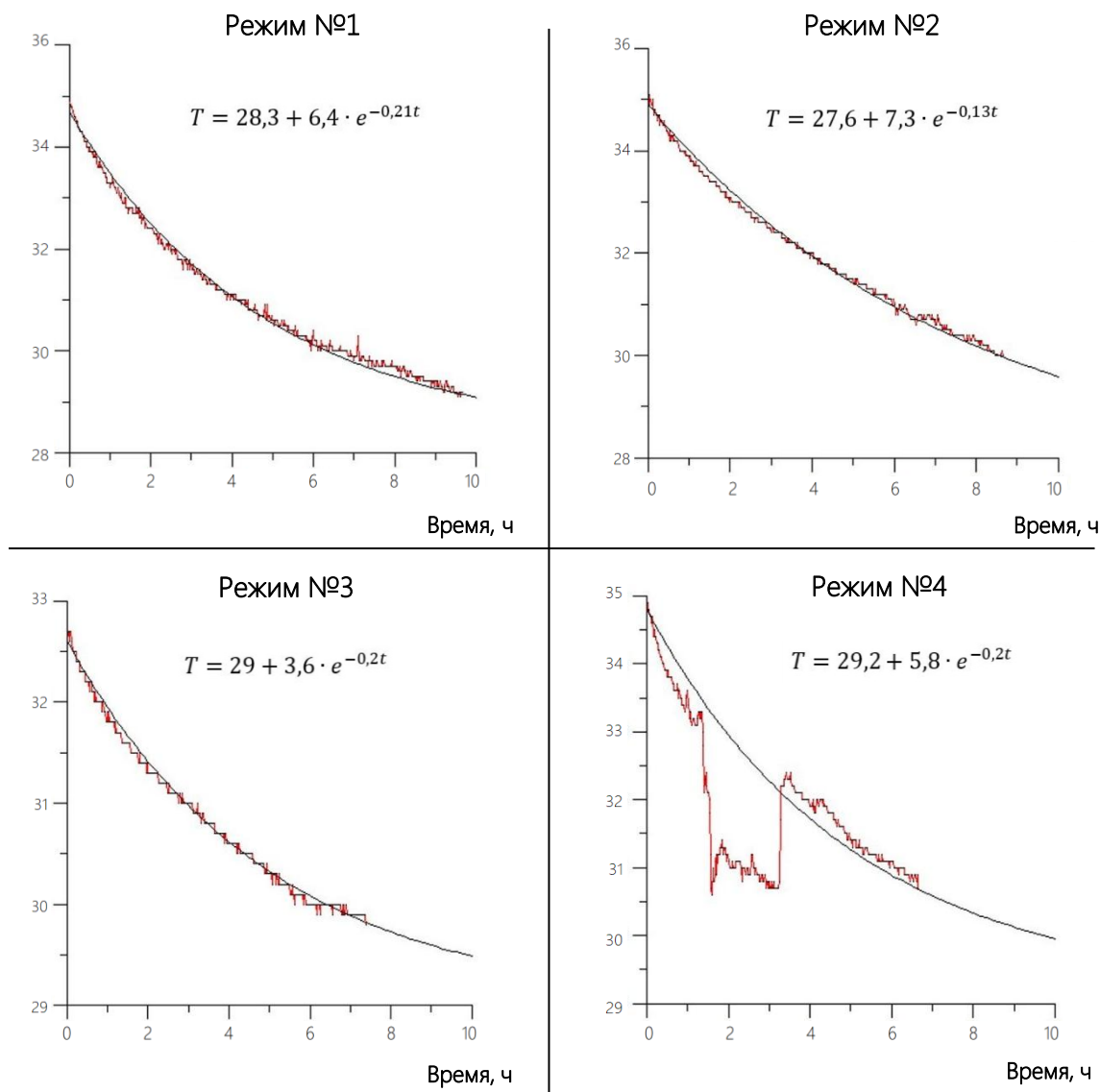


Рисунок 2.7 — Аппроксимирующие кривые охлаждения воздуха в ремонтную смену для исследуемых режимов проветривания

Анализ данных рисунка 2.7 показывает, что для режимов 1 – 3 на всём временном промежутке экспериментальные кривые хорошо соответствуют экспоненциальному закону.

Для оценки скорости остывания оборудования введено характерное время, равное интервалу времени, за которое избыточная температура воздуха снизится в 2,71 раз (величина экспоненты). Таким образом, характерное время определяется по формуле:

$$\tau = \frac{1}{a}. \quad (2.21)$$

Экспериментальные исследования показали, что в ряде ситуаций существенными факторами, оказывающими влияние на микроклимат рабочих зон в длинных очистных забоях, являются:

1. нагрев воздуха при работе конвейеров;

2. нестационарный характер тепловыделений от оборудования.

Данные факторы должны учитываться при разработке моделей тепломассообменных процессов в длинных очистных забоях.

## 2.5 Выводы по главе

На основании выполненных исследований работы нестационарных источников тепловыделения сформулированы следующие выводы:

1. При подаче свежего воздуха по протяженным горным выработкам, оборудованными конвейерными линиями, результирующая температура воздуха определяется не только температурой окружающего массива горных пород, но и суммарным распределенным тепловыделением от работающих конвейеров, общим расходом воздуха и общим временем проветривания.
2. Формируемое распределение температур воздуха является нестационарным, асимптотическое значение во времени зависит от суммарного тепловыделения и общего расхода подаваемого воздуха.
3. При подаче воздуха по двум и более выработкам, только одна из которых оборудована конвейером, минимальная температура воздуха смеси обеспечивается минимально возможной подачей воздуха по конвейерному штреку, так как это приводит к максимальным температурам воздуха в нем и температурному напору между воздухом и массивом горных пород, вследствие чего массив забирает максимальное количество выделяемой теплоты.
4. Основными «накопителями» теплоты в лаве в добычную смену являются: приконтурный массив, оборудование комбайнового комплекса и механизированная крепь лавы. После остановки добычи руды происходит их длительное остывание и постепенная передача накопленной теплоты в рудничную атмосферу в течение времени, значительно превышающего продолжительность ремонтной смены.
5. Снижение температуры воздуха в лаве при остановке оборудования происходит в два этапа: резкое, близкое к линейному (за счет достаточно быстрого уменьшения мощности тепловыделения энергопоезда лавного комбайна, вызванного остановкой комбайна и продолжением работы вентилятора энергопоезда на протяжении 5 – 10 минут), затем — плавное, по экспоненциальному закону. При этом снижение подачи воздуха в ремонтную смену на 33 % приводит к увеличению характерного времени снижения избыточной температуры воздуха на 61 % — с 4 ч 46 мин до 7 ч 41 мин.

б. Скорость охлаждения воздуха в ремонтную смену вблизи нагретого оборудования тем выше, чем больше его температура по завершению добычной смены.

Зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований, должны быть учтены при разработке динамической модели тепломассообменных процессов в длинных очистных забоях. Использование данной модели позволит повысить точность прогноза тепловой нагрузки, испытываемой подземными рабочими.

### **3 ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЛИННЫХ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ**

На начальном этапе выполнено исследование распределения микроклиматических параметров на объекте исследования. Далее разработана математическая модель тепломассообменных процессов в длинных очистных забоях, с учетом полученных в разделе 2 зависимостей нагрева и охлаждения воздуха при разных режимах работы тепловыделяющего оборудования. А также представлены результаты моделирования и описаны перспективные области применения модели.

Результаты, полученные в данной главе, опубликованы в работе [62].

#### **3.1 Экспериментальные исследования распределения параметров микроклимата в длинном очистном забое с учетом нестационарных источников тепловыделений**

Помимо температуры массива существенное влияние на температуру воздуха в рабочих зонах оказывает тепловыделяющее оборудование.

В разделе представлены результаты дискретных измерений в замерных пунктах лавы 4-10в – точечные в пространстве и разовые во времени изменения, характерные для традиционных способов оценки микроклиматических условий, предусмотренных действующей нормативной документацией.

Замерные пункты рабочих зон по микроклиматическому фактору отражают основные характеристики распределения микроклиматических параметров в пределах рабочих зон и учитывают микроклиматические параметры свежего воздуха, поступающего на проветривание выработок рабочей зоны, влияние тепловыделений от оборудования на микроклиматические условия в забое и параметры исходящей струи воздуха из забоя.

Данные, полученные в результате измерений, позволят оценить распределение параметров микроклимата (температура воздуха по сухому термометру и относительная влажность воздуха) в пространстве длинного очистного забоя.

Замеры выполняются для двух рабочих смен: добычной (оборудование энергопоезда и комбайна включено) и ремонтной (оборудование энергопоезда и комбайна выключено).

К местам расположения пунктов замера предъявлялись следующие требования. Каждый замерный пункт находился на прямолинейном не загроможденном участке выработки, имеющем постоянную форму и площадь поперечного сечения в свету. Замерные пункты располагались на расстоянии не менее 15-20 м от мест сопряжений выработок, что исключало возможность наличия неравномерного поля скоростей

воздуха в сечении выработки. Измерения в подготовительных выработках производились в центре на высоте 1,7 м от почвы, в лаве – в центре поперечного сечения выработки.

Замерные пункты в очистном забое располагаются в следующих местах:

1. в транспортном штреке (точка 1);
2. в конвейерном штреке перед энергопоездом (точка 2);
3. в лаве на участке после сопряжения с конвейерным штреком (точка 3);
4. в вентиляционном штреке (точка 4).

Места расположения пунктов замера в очистном забое представлены на рисунке 3.1.

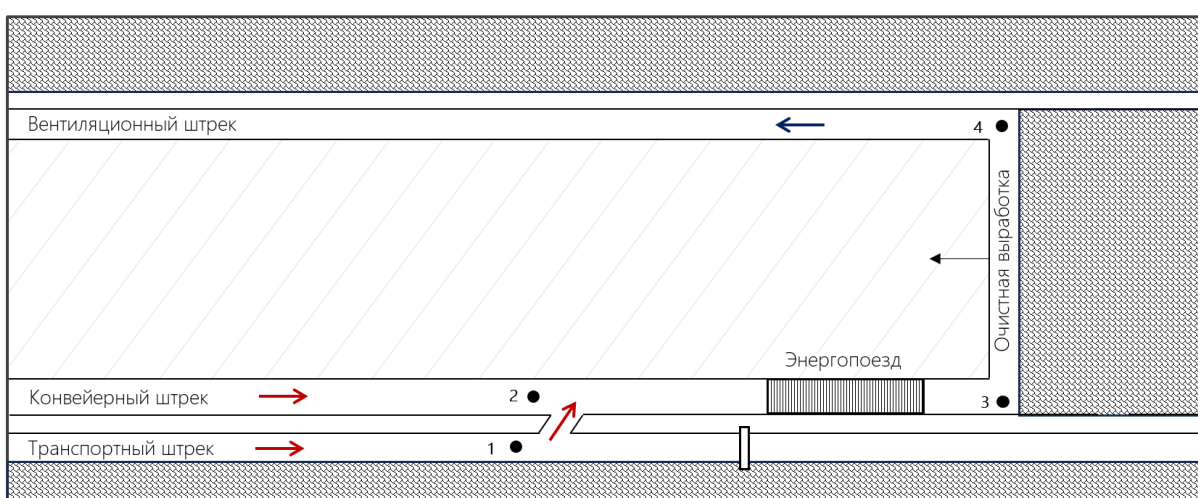


Рисунок 3.1 — Схематичное расположение замерных пунктов в очистном забое

На рисунке 3.2 представлены результаты измерений температур воздуха в характерных точках в добычную смену. Замер выполнен в середине смены при работающем комбайне и комплексе оборудования энергопоезда.



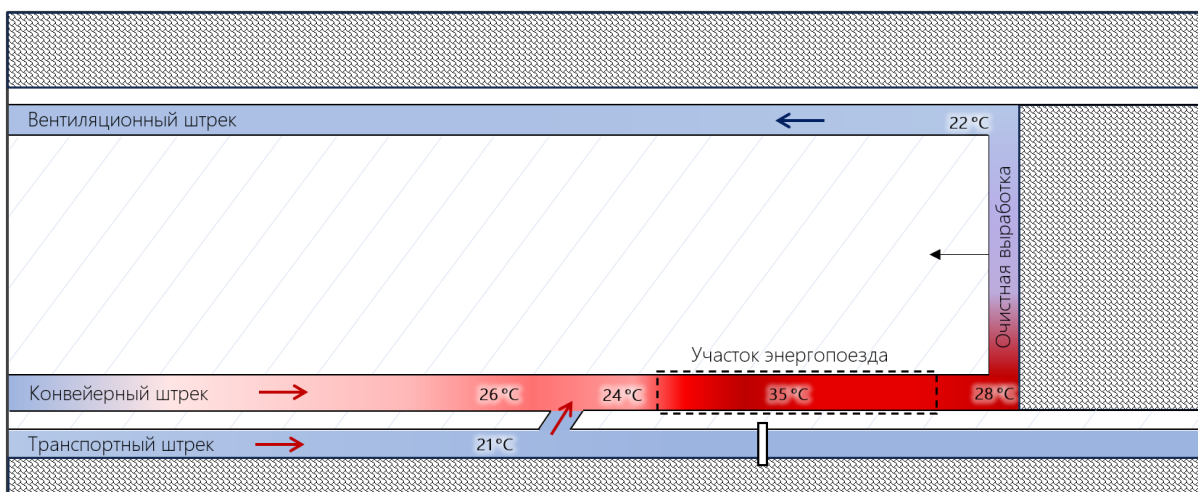


Рисунок 3.2 — Замеренная температура воздуха в выработках лавы №4-10в в добычную смену

На рисунке мы видим, что часть воздуха движется по транспортному штреху, температура воздуха при этом неизменна и равна температуре массива (+21°C). Другая часть воздуха движется по конвейерному штреху нагреваясь от работы конвейерной линии на 5 °С и принимает значение +26°C. Перед энергопоездом происходит смешивание двух потоков, и температура воздуха незначительно падает. Работа энергопоезда сопровождается значительными тепловыделениями в атмосферу выработки в результате чего воздух разогревается до +35°C. При движении воздуха по лаве и вентиляционному штреху происходит его теплообмен с породным массивом, в результате которого все саккумулированное тепло переходит в массив, и температура воздуха снижается до +22°C. Следует отметить, что значения относительной влажности воздуха варьировались от 29 до 38%.

Согласно Правилам по обеспечению промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений РБ к рабочей зоне относится призабойное пространство лавы, одиночная или несколько выработок, в которых ведутся работы с разрушением породного массива в условиях газового режима: очистные, подготовительные, разведочные и другие работы, связанные с отбойкой руды и пустой породы машинным или буровзрывными работами, бурение шпуров и скважин.

Важно отметить, что в рамках данной работы границы рабочей зоны очистного забоя определяются областью мест нахождения рабочих в течение смены, так как именно эти границы определяют тепловую нагрузку на организм рабочего. Рабочая зона при этом может включать несколько рабочих мест и мест пребывания рабочих. Исследования, направленные на изучение фотографий рабочего дня, указывают на частый характер передвижений работников при выполнении рабочих операций. Таким образом в рамках исследования, подземная рабочая зона очистной выработки включает

в себя пространство лавы, часть транспортного штрека от места сопряжения с лавой до места посадки/высадки людей, часть конвейерного штрека от места сопряжения с лавой до места загрузки панельного конвейера.

В условиях существенного изменения температур в лаве и выработках, прилегающих к ней, становится непонятным какую температуру принимать для оценки уровня тепловой нагрузки работника.

Вслед за перемещением работника изменяются и микроклиматические параметры, окружающие его поэтому для точной оценки тепловой нагрузки, помимо распределенных источников тепловыделений и их режимов работы важно учитывать время нахождения работника в тех или иных условиях.

На рисунке 3.3 представлены результаты времени нахождения работников в пределах замерных пунктов.

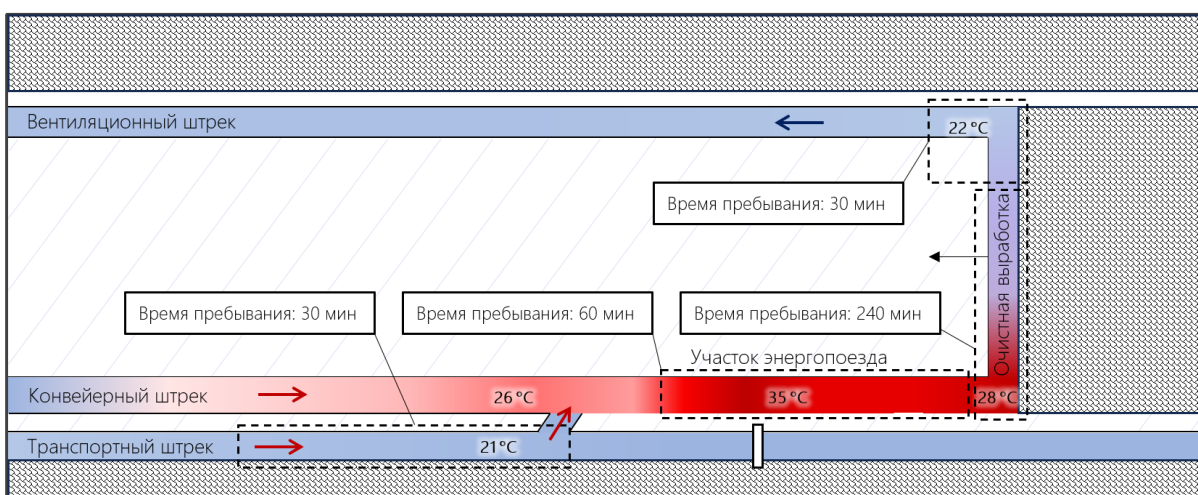


Рисунок 3.3 — Время нахождения работников в пределах исследуемых замерных пунктов

Наиболее точный подход к оценке тепловой нагрузки, испытываемой работником, описан Санитарными нормами и правилами «Гигиеническая классификация условий труда». Согласно документу величины тепловой нагрузки, определяются при помощи ТНС-индекса. В данном документе представлены предельно допустимые значения ТНС-индекса с учетом класса вредности условий труда, а также учтена категория работ по энергозатратам работников.

Расчет величины ТНС-индекса осуществляется по формуле:

$$\text{ТНС} = 0,7 \cdot t_{\text{влаж}} + 0,3 \cdot t_{\text{сух}} \quad (3.1)$$

где  $t_{\text{влаж}}$  – температура воздуха по влажному термометру, °C,  $t_{\text{сух}}$  – температура воздуха по сухому термометру, °C.

Температура воздуха по влажному термометру рассчитывается на основании I-d диаграммы состояния влажного воздуха путем сопоставления температуры воздуха по

сухому термометру и относительной влажности воздуха. При этом при расчетах следует учитывать, что зависимости, представленные на диаграмме, справедливы для конкретного барометрического давления. Для расчетов состояния влажного рудничного воздуха необходимо использовать I-d диаграммы разработанные Щербанем А.Н., Кремневым О.А. и Титовой Н.М. Указанные диаграммы позволяют осуществлять расчет для давлений в диапазоне от 500 до 1000 мм рт. ст. [97].

При этом для оценки тепловой нагрузки за всю смену используется среднесменное значение ТНС-индекса, рассчитываемое по формуле:

$$\overline{\text{ТНС}} = \frac{\text{ТНС}_1 \cdot \tau_1 + \text{ТНС}_2 \cdot \tau_2 + \dots + \text{ТНС}_i \cdot \tau_i}{\sum \tau}, \quad (3.2)$$

где  $\tau_i$  – время, на протяжении которого сохранялись данные температурно-влажностные показатели микроклимата рабочего места работника.

На рисунке 3.4 представлены результаты определения среднесменного значения ТНС-индекса для горнорабочего очистного забоя (ГРОЗ) в добычную смену.

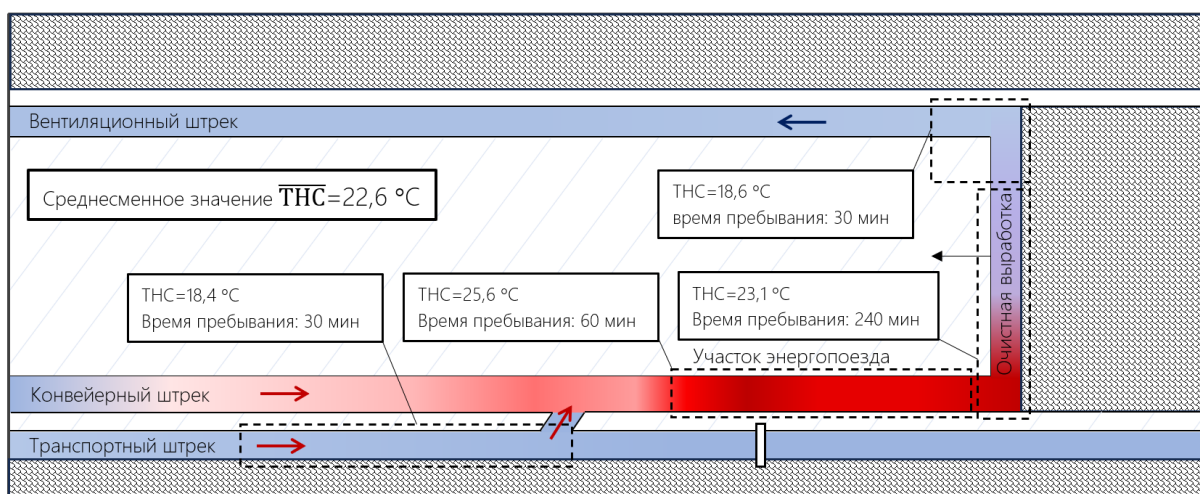


Рисунок 3.4 — Определение среднесменного значения индекса ТНС в добычную смену

Значение среднесменного ТНС-индекса в добычную смену составило  $22,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Из полученных результатов следует что существенное влияние на среднесменное значение ТНС-индекса оказывает работа источников тепловыделения, входящих в состав энергопоезда.

Для сравнения, на рисунке 3.5 представлены результаты дискретных измерений температур воздуха в ремонтную смену.

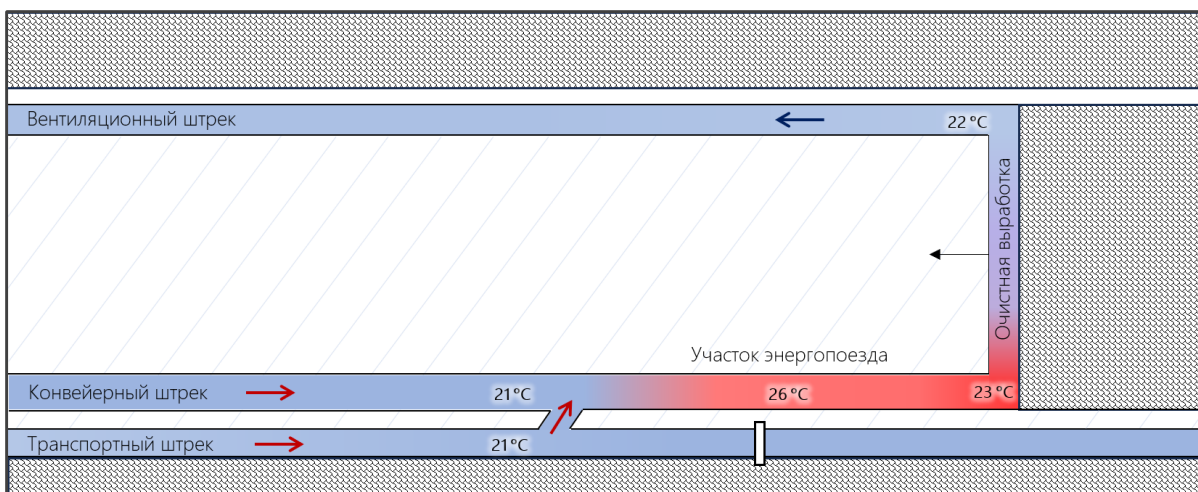


Рисунок 3.5 — Замеренная температура воздуха в выработках лавы №4-10 в ремонтную смену

Ремонтная смена характеризуется отсутствием добычных работ. В результате чего конвейерные линии, а также оборудование участка энергопоезда находятся в выключенном состоянии. Несмотря на это участок энергопоезда по-прежнему имеет более высокие температуры нежели забой лавы. Это связано с тем, что оборудование после выключения остывает постепенно.

На рисунке 3.6 выполнен расчет среднесменной тепловой нагрузки работника в ремонтную смену. Для простоты сравнения принято, что время и места нахождения работника аналогичны добычной смене.

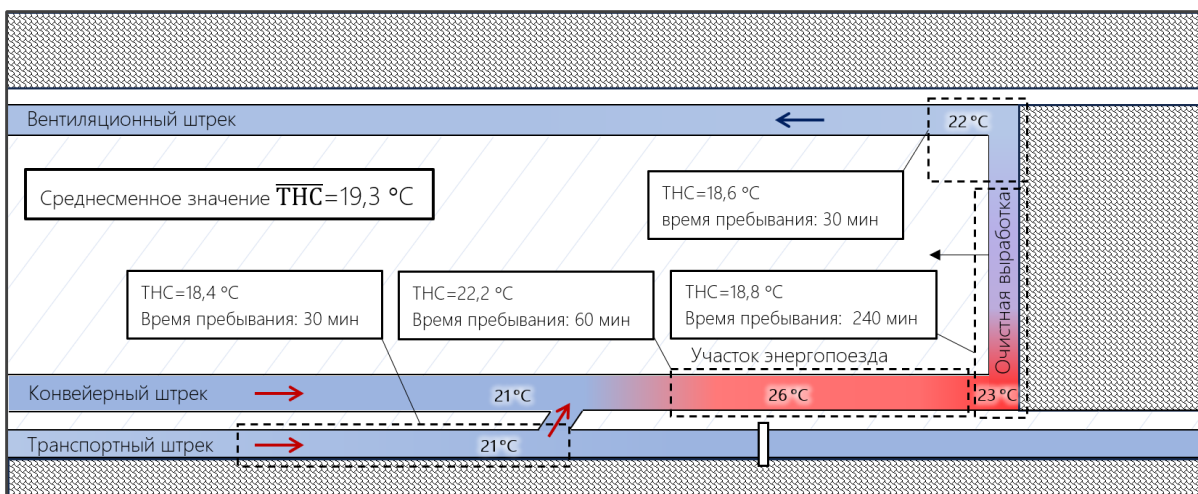


Рисунок 3.6 — Определение среднесменного значения индекса ТНС в ремонтную смену

Среднесменное значение индекса тепловой нагрузки среды в ремонтную смену составило  $+19,3^{\circ}\text{C}$  против  $+22,6^{\circ}\text{C}$  в добычную. Полученные значения указывают на разницу между испытываемой тепловой нагрузкой в ремонтную и добычную смены. При этом разница будет тем выше, чем дольше работники будут находиться на участке, где

располагается тепловыделяющее оборудование. Для точной оценки испытываемой работником тепловой нагрузки важно разработать модель, учитывающую:

- нестационарный/сопряженный теплообмен с массивом;
- протяженность тепловыделяющего оборудования в пространстве выработки;
- величину тепловыделений при различных режимах работы оборудования;
- перемещение работника в течение рабочей смены.

### **3.2 Разработка динамической модели тепломассообменных процессов в длинных очистных забоях**

Динамическая модель разрабатывается для возможности прогнозирования изменения микроклиматических параметров в рабочей зоне по отдельным измерениям в нескольких фиксированных моментах времени в течение одной смены при заданных режимах работы оборудования. Таким образом, математическое моделирование позволит оценивать распределение микроклиматических параметров без проведения мониторинга микроклиматических параметров в каждой точке рабочей зоны, а также разрабатывать мероприятия по снижению влияния неблагоприятного микроклимата на здоровье горнорабочих.

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

Рассматривается система горных выработок лавы № 4-10в (рисунок 3.7). Движение воздушных потоков в этой системе горных выработок предполагается установившимся и неизотермическим. Воздух движется по транспортному и конвейерному штрекам лавы, далее через сбойку между транспортным и конвейерным штреками весь воздушный поток с транспортного штрека переходит на конвейерный и омывает энергопоезд. В результате течения около работающего энергопоезда воздух приобретает дополнительную теплоту, и его температура увеличивается. Далее воздушный поток поступает в очистную выработку и движется по ней, после чего сбрасывается на вентиляционный штрек. В процессе движения по очистной выработке воздушный поток контактирует с породным массивом, вследствие чего происходит теплообмен между массивом и воздухом.

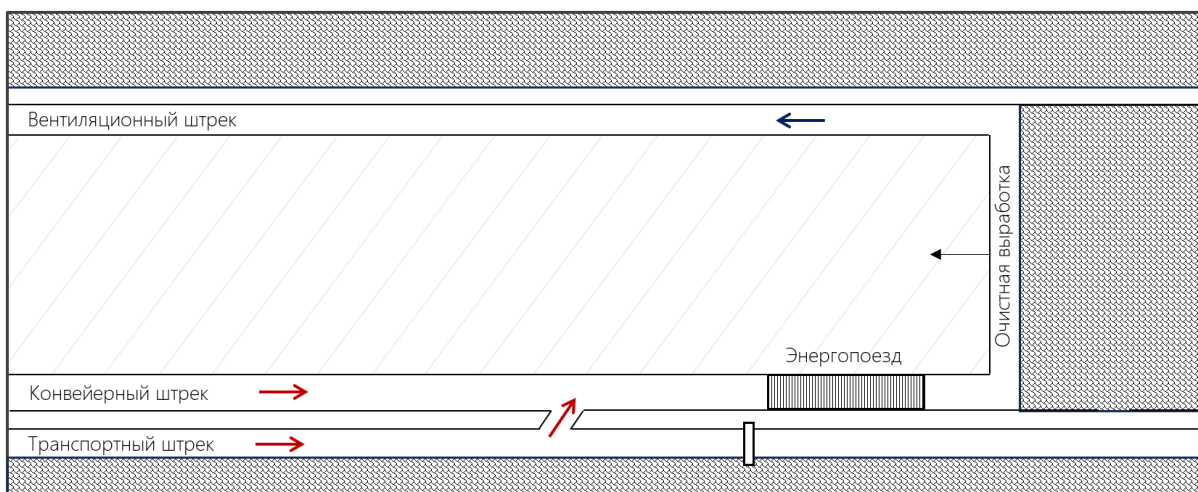


Рисунок 3.7 — Схема горных выработок лавы

Модель позволяет производить моделирование теплофизических процессов, протекающих в рудничной атмосфере, и может быть использована для расчетов микроклиматических параметров в длинных очистных забоях при решении задач прогнозирования и нормализации микроклиматических параметров рудничного воздуха.

### 3.2.1 Постановка модели

Модель имеет следующие допущения:

- в поперечном сечении рассматриваемых горных выработок микроклиматические параметры считаются распределенными однородно;
- плотность воздуха по всей длине принимается постоянной;
- в модели не учитывается движение воздуха в выработанном пространстве;
- скорость воздуха по всей длине принимается постоянной;
- параметры выработки (тип сечения, высота, ширина) по длине считаются постоянными
- в модели не учитываются тепловые процессы, связанные с химическими реакциями в породном массиве и в воздухе;
- в связи с явно выраженным турбулентным течением воздуха в выработке принимается, что температура воздуха по сечению выработки одинакова.
- теплопередача в воздухе не учитывается;
- модель является одномерной;
- массоперенос в породном массиве отсутствует;
- теплообмен вдоль выработки отсутствует;
- диффузионный теплоперенос в воздухе не учитывается.

Основной особенностью модели является учет нестационарного теплообмена между воздухом и источником тепловыделения (энергопоездом или другой техникой в выработке). Предполагается, что источник тепловыделения, находящийся в горной выработке, имеет заданную тепловую мощность и заданную теплоемкость. Также он оборудован собственной системой охлаждения: при работе источника происходит обдув его двигателя вентиляторами. При остановке источника обдув прекращается, и он остывает за счет естественного теплообмена с воздухом.

Предполагается, что источник тепловыделения имеет однородную температуру по своему объему. В этом случае изменение его температуры может быть описано следующим уравнением теплового баланса:

$$\begin{aligned} \rho_T \cdot c_T \cdot V_T \cdot \frac{\partial T_T}{\partial t} = \\ = W + (T_B - T_T) \cdot \alpha \cdot S + k(T_B - T_T), \end{aligned} \quad (3.3)$$

где  $\rho_T$  – плотность поверхности источника тепловыделения, кг/м<sup>3</sup>;  $c_T$  – теплоемкость поверхности источника тепловыделения, Дж/(кг·°C);  $T_T$  – температура поверхности источника тепловыделения, °C;  $W$  – мощность источника тепловыделения, Вт;  $T_B$  – температура воздуха, °C;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·K);  $S$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $k$  – интегральный коэффициент теплоотдачи системы охлаждения источника, Вт/°C.

Таким образом, при работе энергопоезда источник активен и тепловыделения в нем происходят с интенсивностью, характеризуемой эффективным источником тепловыделения

$$\alpha_{eff} = \alpha + \frac{k}{S}.$$

А при отключении энергопоезда источник не активен, а интенсивность его теплообмена с воздушным пространством горной выработки определяется обычным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ , который ниже эффективного коэффициента теплоотдачи. Разница в коэффициентах теплоотдачи при включенном и выключенном энергопоезде позволяет учесть разную скорость процессов нагрева и охлаждения воздуха в очистной лаве при включении и отключении энергопоезда. Параметр  $k$  при этом должен определяться эмпирически.

При учете теплоты энергопоезда уравнение (3.1) теплопереноса в горной выработке модифицируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_B \cdot c_B \cdot \left( S_B \cdot \frac{\partial T_B}{\partial t} + Q_B \cdot \frac{\partial T_B}{\partial x} \right) \\ = (T_T - T_B) \cdot \alpha_{eff} \cdot P + (T_M - T_B) \cdot \alpha_M \cdot P_M. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Уравнение кондуктивного теплопереноса в породном массиве имеет вид:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T_M}{\partial t} = \lambda_R \cdot \left( \frac{\partial^2 T_M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_M}{\partial r} \right). \quad (3.5)$$

Данное уравнение дополняется граничными условиями теплообмена на границе с горной выработкой

$$\lambda_R \cdot \frac{\partial T_M}{\partial r} = (T_B - T_M) \cdot \alpha_M \cdot P_M,$$

где  $\lambda_R$  – коэффициент теплопроводности, (Вт/м·С);  $r$  – радиус горной выработки, м;  $\alpha_M$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $P_M$  – периметр горной выработки, м.

и условием непоотревоженного породного массива на заданном удалении от горной выработки:

$$T_M = T_M^{(0)},$$

где  $T_M^{(0)}$  – температура непоотревоженного массива на заданном удалении от горной выработки, °С.

Граничные и начальные условия по температурам воздуха и техники, необходимые для замыкания системы уравнений (3.3) – (3.5), приведены ниже:

$$T_B(t, 0) = T_{in}, \quad (3.6)$$

$$T_B(0, x) = T_T(0) = T_0, \quad (3.7)$$

где  $T_{in}$  – температура воздуха, поступающего к участку энергопоезда после теплообмена с конвейерной линией, °С, определяется зависимостью (2.16).

Помимо распределения температуры на практике бывает важно знать распределение влагосодержания в горных выработках. Расчет распределения влагосодержания  $d_B$  осуществляется с помощью уравнения конвективного переноса:

$$S_B \cdot \frac{\partial d_B}{\partial t} + Q_B \cdot \frac{\partial d_B}{\partial x} = M, \quad (3.8)$$

где  $M$  — источник влаги (скорость выделения массы влаги на 1 погонный метр горной выработки), м<sup>3</sup>/м·с.

Плотность воздуха рассчитывается по формуле

$$\rho = \frac{29P - 0.11\varphi(479 + (11.52 + 1.62T)^2)}{8314(T + 273)}, \quad (3.9)$$



где  $P$  – давление, Па;  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %;  $T$  – температура воздуха, °С.

Влажность воздуха рассчитывается по формуле

$$\varphi = \frac{d}{d_{max}}. \quad (3.10)$$

Максимальное влагосодержание влажного воздуха рассчитывается по формуле

$$d_{max} = 621,98 \cdot \frac{P_n}{P_6 - P_n}, \quad (3.11)$$

где  $P_n$  – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па;  $P_6$  – барометрическое давление воздуха, Па.

Барометрическое давление воздуха зависит от глубины выработки и определяется по формуле:

$$P_{бар} = P_0 \cdot e^{\frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot (T_{атм} + 273.15)}}, \quad (3.12)$$

где  $P_0$  — давление на уровне земли, кПа;  $M = 0.029$  кг/моль — молярная масса воздуха;  $h$  — глубина выработки, м;  $R = 8.31$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T_{атм}$  — температура воздуха на поверхности, °С;  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения.

Парциальное давление насыщенного водяного пара, зависит от температуры среды:

$$P_n = 0,6112 \cdot e^{\frac{\alpha \cdot t}{\beta + t}}, \quad (3.13)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – постоянные для воды  $\alpha = 17,504$ ,  $\beta = 241,2$  °С;  $T$  – температура воздуха в выработке, °С.

В случае расчета распределения влагосодержания, для уравнения (3.6) также записываются начальные и граничные условия, аналогичные (3.4) – (3.5).

### 3.2.2 Параметризация модели

Параметризация модели осуществляется на основании данных эксперимента, представленного в разделе 2.4.

Результаты измерений температуры воздуха в рабочей зоне лавы температурно-влажностными датчиками приведены на рисунке 3.8.

Показания датчиков контролировались за мерами термовлагомера.

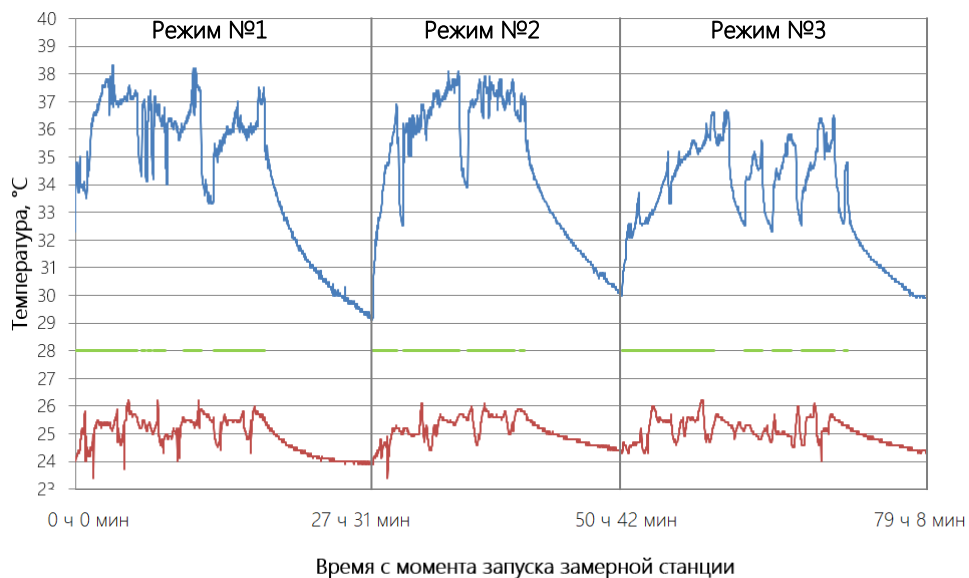


Рисунок 3.6 — изменения температуры воздуха, регистрируемые температурно-влажностными датчиками

Расходы воздуха, соответствующие добычной и ремонтной сменам для исследуемых режимов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Расходы воздуха в лаве для исследуемых режимов

		Вентилятор энергопоезда	Q, м <sup>3</sup> /с
Режим 1	Добычная	включен	7,46
	Рабочая	отключен	6,92
Режим 2	Добычная	включен	7,54
	Рабочая	отключен	5,05
Режим 3	Добычная	отключен	7,23
	Рабочая	отключен	6,45
	Рабочая	отключен	4,97

В разработанной модели содержатся параметры  $\alpha, k$ . Они определяются на основании анализа данных эксперимента.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , определяется выражением

$$\alpha = \frac{\alpha P}{\rho c Q} \quad (3.4)$$

где  $\alpha$  – параметр экспоненты, отвечающий за скорость снижения температуры, ч<sup>-1</sup> при выключенном оборудовании энергопоезда.

Вычисленные аппроксимирующие кривые для исследуемых режимов охлаждения представлены на рисунке 3.9

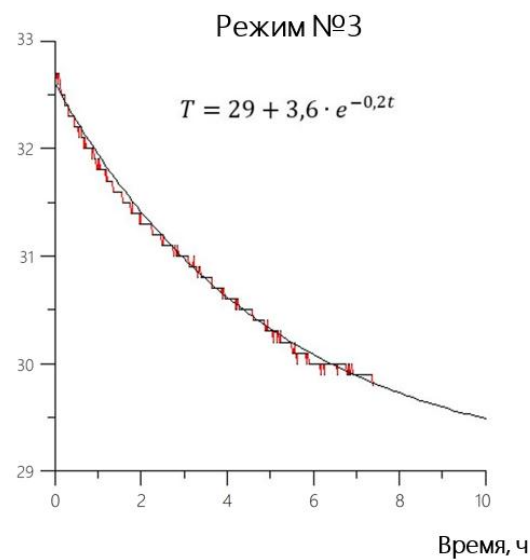
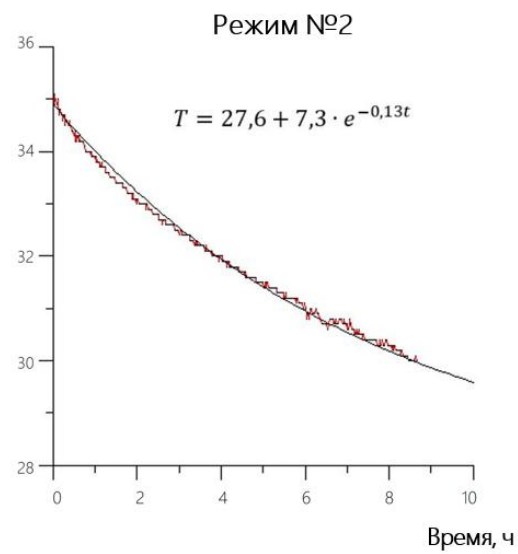
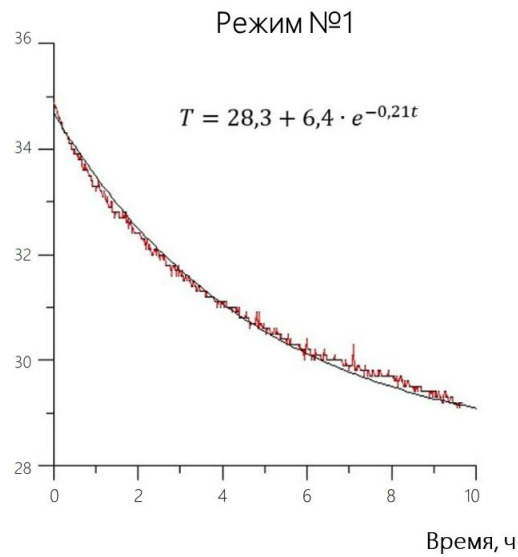


Рисунок 3.9 — Аппроксимирующие кривые охлаждения воздуха в ремонтную смену для исследуемых режимов проветривания

Интегральный коэффициент теплоотдачи системы охлаждения источника  $k$ , определяется выражением

$$b = \frac{\left(\alpha + \frac{k}{S}\right) P}{\rho c Q} \quad (3.4)$$

где  $b$  – параметр экспоненты, отвечающий за скорость увеличения температуры,  $ч^{-1}$  при включении оборудования энергопоезда.

Вычисленные аппроксимирующие кривые для исследуемых режимов нагрева представлены на рисунке 3.10.

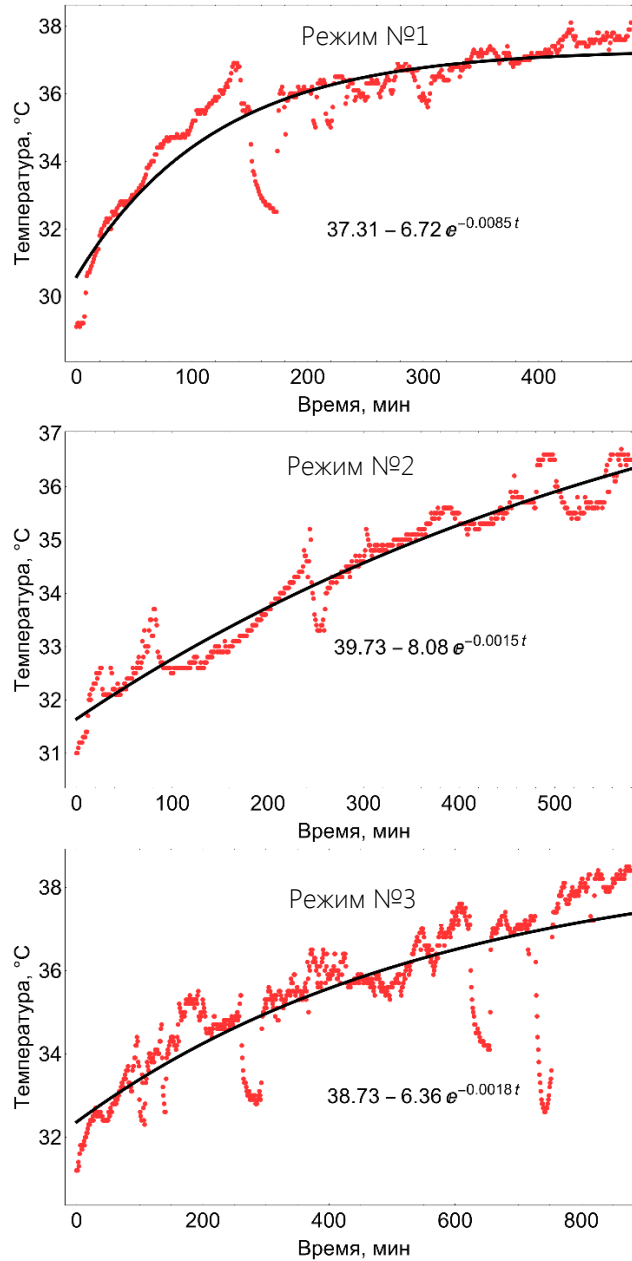


Рисунок 3.10 — Аппроксимирующие кривые нагрева воздуха в добычную смену для исследуемых режимов проветривания

### 3.2.3 Верификация разработанной математической модели

Для верификации разработанной модели выполнен прогнозный расчет распределения температур воздуха в характерных точках:

1. в транспортном штреке;
2. в конвейерном штреке перед энергопоездом;
3. в лаве на участке после сопряжения с конвейерным штреком;
4. в вентиляционном штреке.

Указанные расчеты выполнены для добычной и ремонтной смен. Верификация модели выполнена путем сравнения результатов моделирования с реальными показаниями датчиков непрерывного контроля, размещенными в исследуемых точках.

Режимы работы тепловыделяющего оборудования приняты в соответствии с режимами, зафиксированными в ходе эксперимента.

#### Добычная смена

В рамках исследуемой смены наблюдались следующие режимы работы и остановки тепловыделяющего оборудования.

Таблица 3.2 — Режимы работы тепловыделяющего оборудования

	Режим работы		
	Пуск	Работа	Останов
Конвейер	17:30	14:00-16:10 17:30-18:30	16:10-17:30
Оборудование энергопоезда	17:30	14:00-16:10 17:30-18:30	16:10-17:30

Числовые параметры модели, соответствующие результатам замеров представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 — Числовые параметры модели

Параметр	Значение
Длина исследуемого участка конвейерного штрека, м	100
Длина лавы, м	276
Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>	1,31
Удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С)	1005
Скорость воздуха в транспортном штреке, м/с	1,0
Скорость воздуха в конвейерном штреке около энергопоезда, м/с	0,9
Скорость воздуха в лаве, м/с	1,96

Параметр	Значение
Площадь сечения транспортного штрека, м <sup>2</sup>	8,1
Площадь сечения конвейерного штрека, м <sup>2</sup>	10
Площадь сечения лавы, м <sup>2</sup>	4,59
Температура воздуха на входе (транспортный штрек) на начало исследований, °С	21,1
Температура воздуха на входе (конвейерный штрек) на начало исследований, °С	26,2
Температура воздуха на входе (начало лавы) на начало исследований, °С	32,9
Температура породного массива, °С	21,0
Относительная влажность воздуха на входе (транспортный штрек), %	35,3
Относительная влажность воздуха на входе (конвейерный штрек), %	36,0
Мощность тепловыделения от энергопоезда, кВт	100

Места расположения пунктов замера в очистном забое представлены на рисунке 3.11.

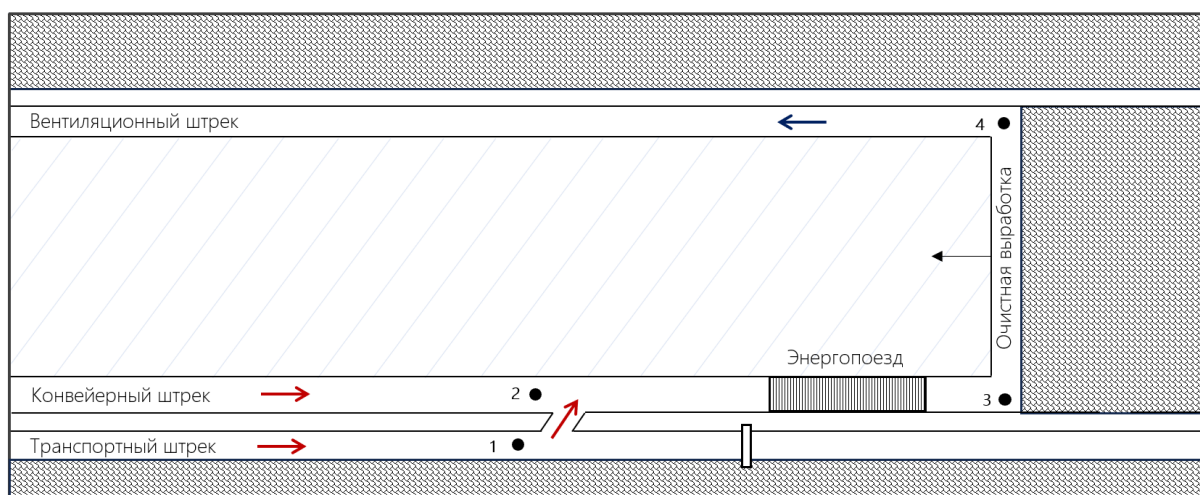


Рисунок 3.11 — Схематичное расположение замерных пунктов в очистном забое

На заключительном этапе произведено сопоставление данных расчета и измерений по всем исследуемым точкам, в наглядном виде результаты сопоставления приведены на рисунках 3.12 – 3.15.



Рисунок 3.12 — Расчетный график изменения температуры воздуха в точке 1 (транспортный штрэк)

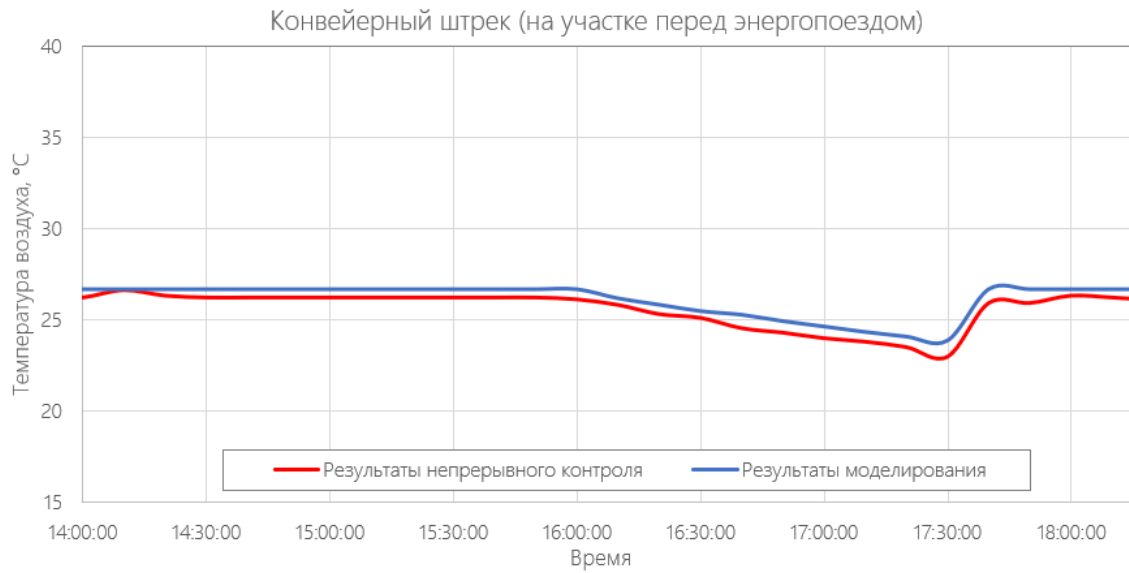


Рисунок 3.13 — Расчетный график изменения температуры воздуха в точке 2 (участок перед энергопоездом)

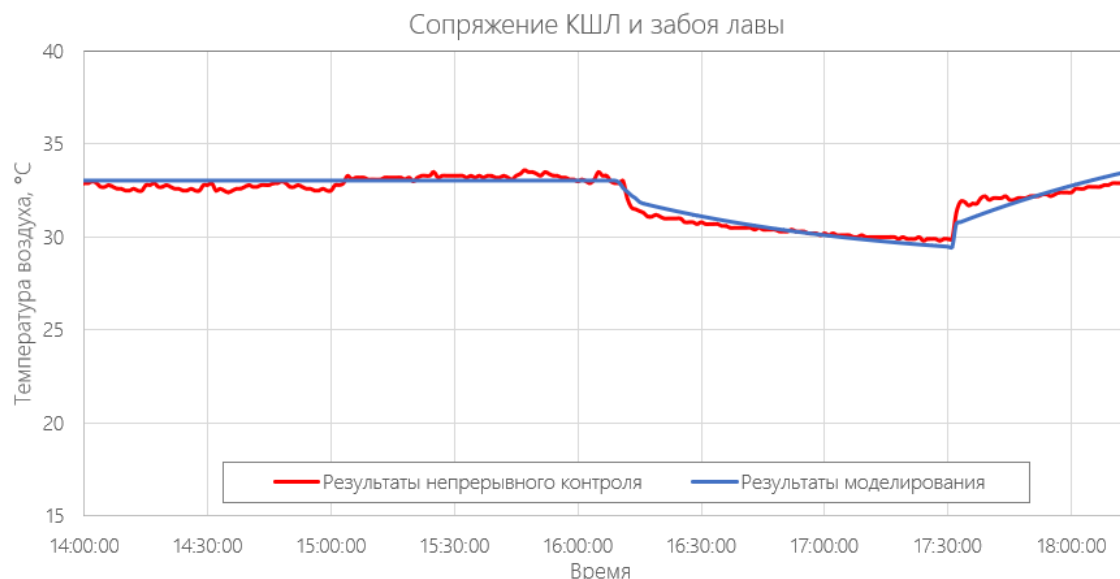


Рисунок 3.14 — Расчетный график изменения температуры воздуха в точке 3 (сопряжение КШЛ и забоя лавы)

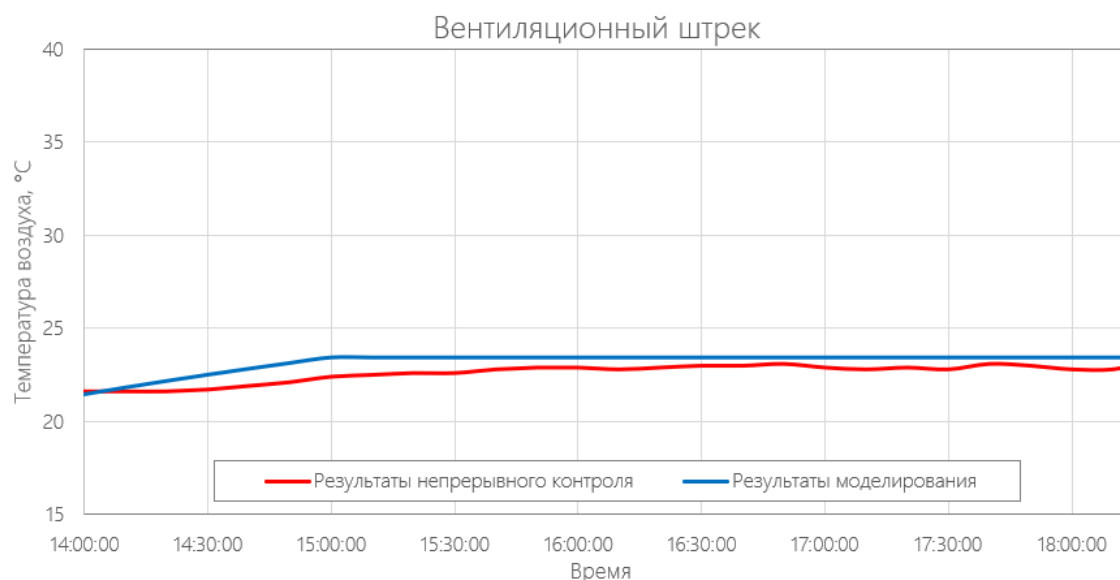


Рисунок 3.15 — Расчетный график изменения температуры воздуха в точке 4 (вентиляционный штрек)

Согласно рисункам, наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных кривых. Характерной особенностью результатов экспериментальных исследований является экспоненциальный режим нагрева и охлаждения тепловыделяющего оборудования в моменты пуска/останова, соответствующие экспериментальным данным.

#### **Ремонтная смена**

В ремонтную смену конвейерная лента, а также оборудование энергопоезда находилось в режиме останова.

Числовые параметры модели, соответствующие результатам замеров представлены в таблице 3.4.



Таблица 3.4 — Числовые параметры модели

Параметр	Значение
Длина исследуемого участка конвейерного штрека, м	100
Длина лавы, м	276
Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>	1,31
Удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С)	1005
Скорость воздуха в транспортном штреке, м/с	1,0
Скорость воздуха в конвейерном штреке около энергопоезда, м/с	0,9
Скорость воздуха в лаве, м/с	1,96
Площадь сечения транспортного штрека, м <sup>2</sup>	8,1
Площадь сечения конвейерного штрека, м <sup>2</sup>	10
Площадь сечения лавы, м <sup>2</sup>	4,59
Температура воздуха на входе (транспортный штрек) на начало исследований, °С	21,1
Температура воздуха на входе (конвейерный штрек) на начало исследований, °С	25,0
Температура воздуха на входе (начало лавы) на начало исследований, °С	33,8
Температура породного массива, °С	21,0
Относительная влажность воздуха на входе (транспортный штрек), %	35,0
Относительная влажность воздуха на входе (конвейерный штрек), %	36,3

На заключительном этапе произведено сопоставление данных расчета и измерений по всем исследуемым точкам, в наглядном виде результаты сопоставления приведены на рисунках 3.16 – 3.19.



Рисунок 3.16 — Расчетный график изменения температуры воздуха в точке 1 (транспортный штретк)

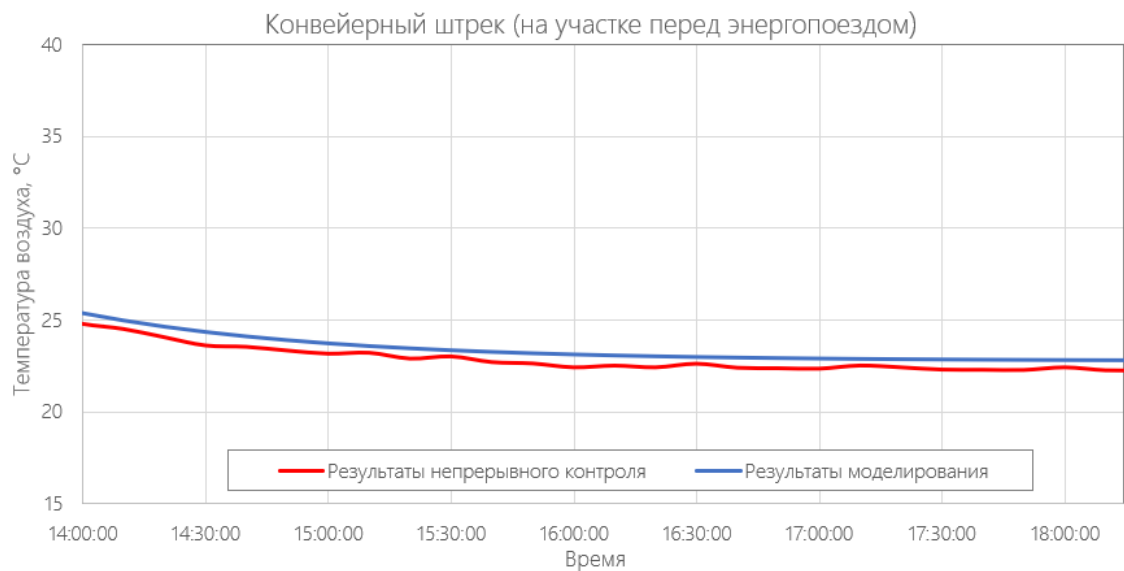


Рисунок 3.17 — Расчетный график изменения температуры воздуха в точке 2 (участок перед энергопоездом)

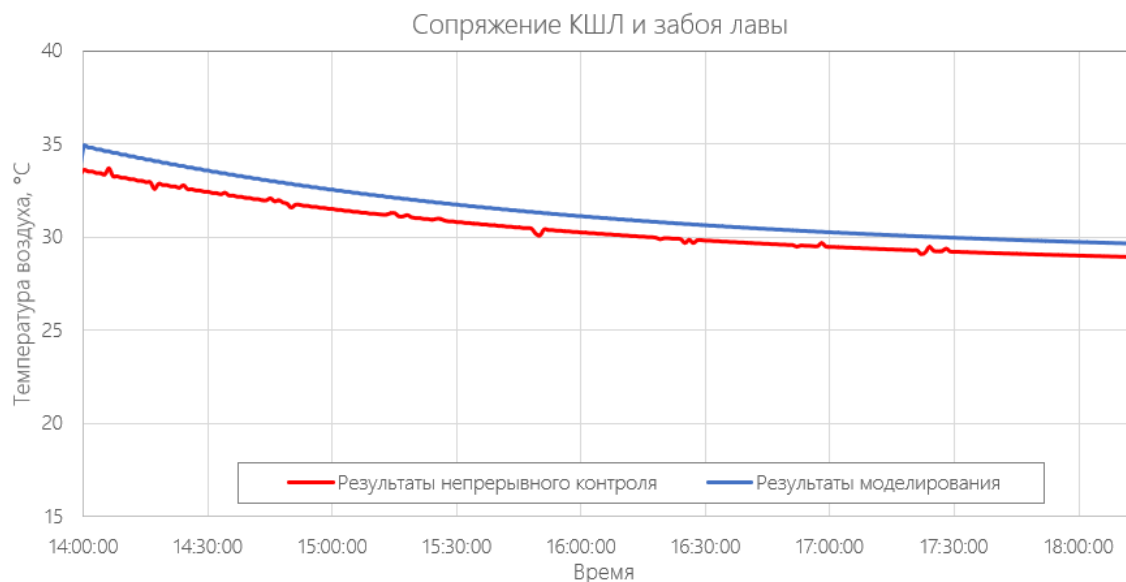


Рисунок 3.18 — Расчетный график изменения температуры воздуха в точке 3 (сопряжение КШЛ и забоя лавы)

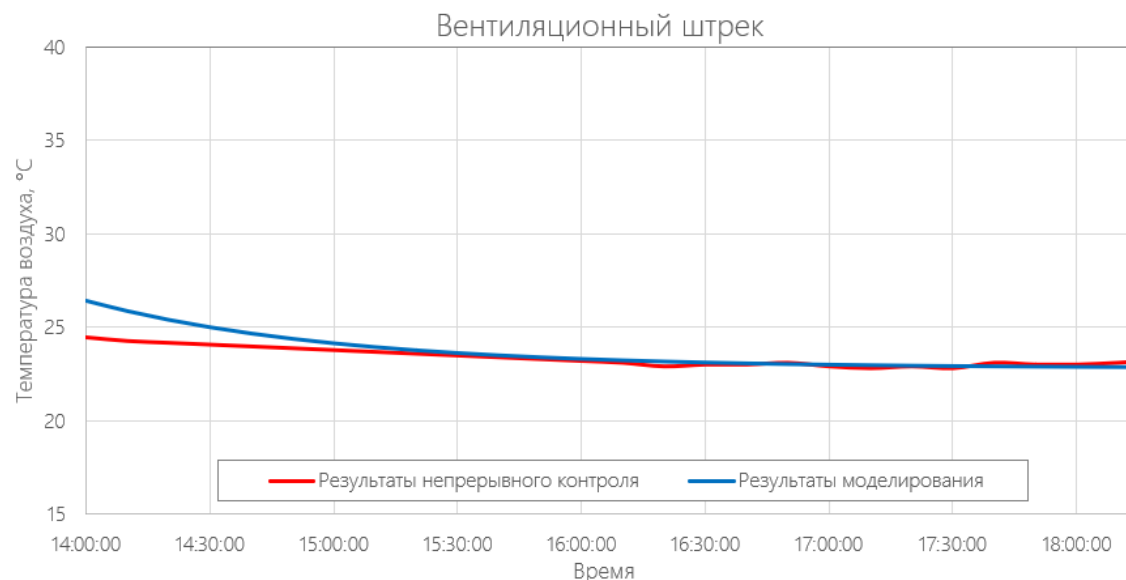


Рисунок 3.19 — Расчетный график изменения температуры воздуха в точке 4 (вентиляционный штрек)

Согласно рисункам, наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных кривых. Также, как и в добычную смену графики достоверно описывают охлаждение воздуха после останова тепловыделяющего оборудования.

Результаты моделирования свидетельствуют о высокой сходимости с результатами эксперимента и могут быть использованы при прогнозе микроклиматических условий в длинных очистных забоях.

### 3.3 Результаты моделирования

Разработанная в главе динамическая модель позволяет строить распределение температур воздуха в пространстве и времени для длинного очистного забоя с учетом режимов работы тепловыделяющего оборудования.

При построении, указанного поля, задается режим работы оборудования, а также входные параметры модели.

В таблице 3.5 представлен пример исходных данных для расчета.

Таблица 3.5 — Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Количество ячеек сетки	50
Длина исследуемого участка конвейерного штрека, м	100
Длина лавы, м	200
Температура нетронутого массива, °С	21,0
Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>	1,22
Удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С)	1005
Скорость воздуха в транспортном штреке, м/с	1,0
Скорость воздуха в конвейерном штреке около энергопоезда, м/с	0,9
Скорость воздуха в лаве, м/с	1,96
Площадь сечения транспортного штрека, м <sup>2</sup>	8,1
Площадь сечения конвейерного штрека, м <sup>2</sup>	10
Площадь сечения лавы, м <sup>2</sup>	4,59
Температура воздуха на входе (конвейерный штрек) на начало исследований, °С	25,0
Температура воздуха на входе (начало лавы) на начало исследований, °С	33,8
Относительная влажность воздуха на входе (транспортный штрек), %	35,0
Относительная влажность воздуха на входе (конвейерный штрек), %	36,3
Толщина массива, испытывающая тепловое возмущение, м	0,07
Удельная теплоемкость массива, Дж/(кг·°С)	800
Теплопроводность массива, Дж/(кг·°С)	1,2
Плотность массива, кг/м <sup>3</sup>	2200
Конечное время моделирования, мин	1080

Параметр	Значение
Интервалы работы техники	06:00-11:00 11:30-11:45
Интервалы остановки техники	00:00-06:00 11:00-11:30 11:45-12:00
Тепловая мощность источника, Вт	70000
Теплоемкость источника, Дж/°С	1000000

Результаты моделирования представлены на рисунке 3.20

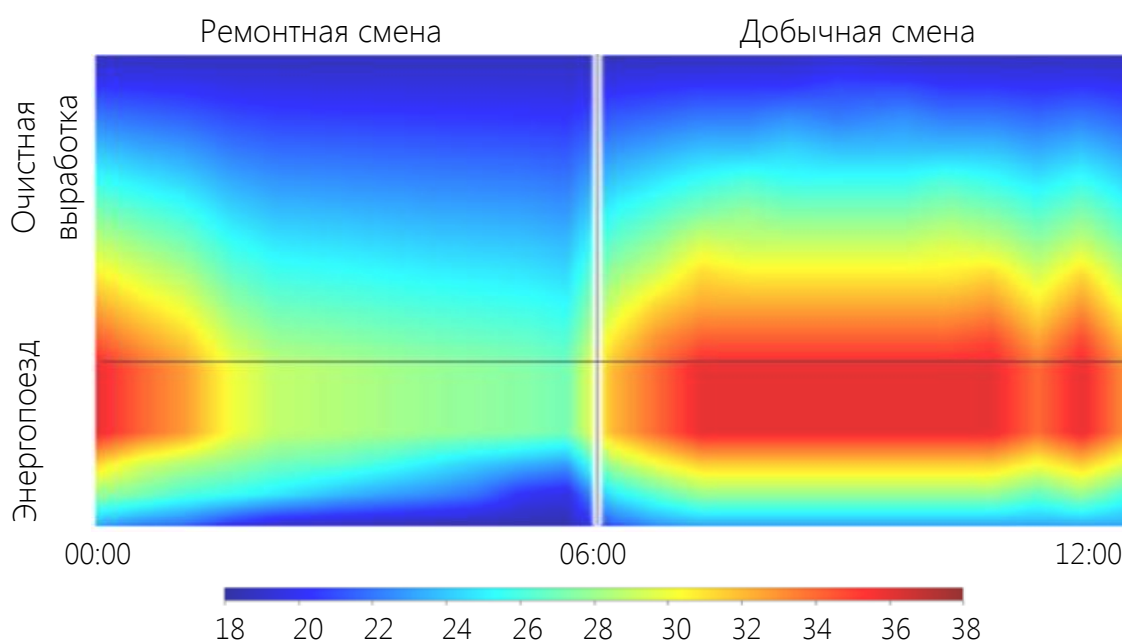


Рисунок 3.20 — Результаты моделирования

Результатом моделирования выступает рассчитанное поле температур для участка конвейерного штрека (участок от начала энергопоезда до сопряжения с забоем лавы) и забоя лавы.

Полученное распределение температур в совокупности с данными о местах нахождения работников в течение смены позволяют прогнозировать уровень тепловой нагрузки на различных участках существующих и перспективных длинных очистных забоев.

Предложенная динамическая модель использована в основе программы «ТНС». Программа позволяет рассчитывать распределение микроклиматических параметров воздуха в пространстве и времени в привязке ко времени нахождения рабочих, динамики расходов и тепловыделений от оборудования в горных выработках. Разработанный программный продукт, позволяет оценивать эффективность различных способов

регулирования теплового режима и защиты горнорабочих от воздействия фактора микроклимат в зависимости от теплового режима участка рудника и горнотехнических условий. На разработанную программу получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023687145 от 12 декабря 2023 года [73].

### **3.4 Выводы по главе**

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. разработана динамическая модель позволяющая учитывать:
  - сочетанное влияние параметров микроклимата на оказываемую тепловую нагрузку;
  - нестационарный/сопряженный теплообмен с массивом;
  - протяженность тепловыделяющего оборудования в пространстве выработки;
  - нестационарный характер работы тепловыделяющего оборудования;
  - перемещение работника в течение рабочей смены;
2. выполнена параметризация и верификация модели;
3. результаты моделирования позволяют прогнозировать уровень тепловой нагрузки на различных участках существующих и перспективных длинных очистных забоев;
4. при разработке методик по снижению неблагоприятного влияния нагревающего микроклимата необходимо учитывать нестационарный характер тепловыделений от работающего оборудования, а также перемещение работника в течение рабочей смены.

Таким образом, разработанная динамическая модель позволяет рассчитывать распределение параметров микроклимата в пространстве длинных очистных забоев с учетом режимов работы протяженных источников тепловыделения. Полученные результаты могут быть использованы в качестве исходных данных при расчете испытываемой работниками тепловой нагрузки.

#### **4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ**

Современные глубокие шахты и рудники обладают сложной топологией сетей горных выработок, высокой глубиной ведения работ и применением мощного оборудования. Все это неуклонно ведет к ухудшению микроклиматических условий в рабочих зонах и остро ставит задачу нормализации микроклимата. Решение задачи нормализации микроклиматических условий в рабочих зонах шахт и рудников может достигаться рядом способов, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками, а также имеет свою область применения. При выборе мероприятий по нормализации микроклимата перед руководителями стоит задача обеспечения безопасных условий труда при минимальных затратах. В разделе представлен алгоритм комплексирования организационных и технических мероприятий, позволяющий удовлетворить обоим требованиям. Представлены результаты применения разработанного подхода к нормированию микроклимата на ряде крупных горнодобывающих предприятий. Представлен опыт успешной разработки обоснования промышленной безопасности опасного производственного объекта.

Результаты, полученные в данной главе, опубликованы в работах [7, 27, 28].

##### **4.1 Обоснование критерия для управления тепловым режимом**

Повышенные температуры воздуха в подземных выработках рудников могут иметь негативное воздействие на эффективность работы оборудования. Это способно приводить к перегреву оборудования и аварийным остановкам, его коррозии и как следствие снижению срока эксплуатации.

Следует также учитывать влияние высоких температур на работников. Долговременное нахождение работников в условиях неблагоприятного микроклимата может вызывать тепловой стресс последствием которого являются физическое и психологическое утомление, а также ухудшение здоровья работников.

Таким образом, неблагоприятный микроклимат имеет потенциально серьезные последствия для безопасности и производительности рудника в целом.

Согласно требованию п. 155 «Правил безопасности при ведении горных работ ...» [119], температура воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок, а также на рабочих местах с постоянным присутствием персонала не должна превышать +26°C.

Рассмотрим результаты измерения температуры в очистной выработке и в примыкающим к ней выработкам представленные на рисунке 4.1. Мы видим, что

температуры воздуха при его движении от конвейерного к вентиляционному штрэку принимают разные значения. Работа оборудования энергопоезда приводит к тепловыделениям и как следствие к нагреву воздуха на данном участке. В дальнейшем происходит теплообмен воздуха с массивом, и температура воздуха постепенно снижается. Рассматривая нормирование с позиции правил безопасности, мы должны предусматривать системы охлаждения воздуха поскольку имеем превышение на участке энергопоезда. С другой стороны, превышение является локальным, и работник в этом месте практически не находится что ставит вопрос целесообразности охлаждения всего объема воздуха.

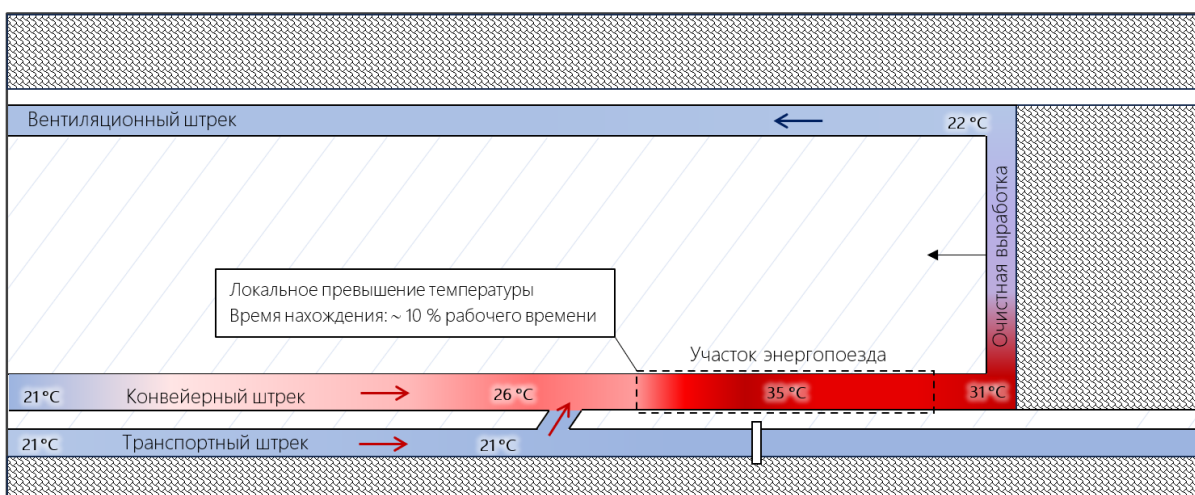


Рисунок 4.1 — Результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в длинном очистном забое

Кроме того, установка максимальной температуры воздуха в качестве стандарта для регулирования микроклимата не является подходящей, поскольку эффективность терморегуляции организма определяется не значением температуры воздуха в конкретный момент времени, а накопленной тепловой нагрузкой. Под терморегуляцией подразумевают совокупность физиологических процессов, направленных на поддержание температуры мозга и внутренних органов в узких определенных границах, несмотря на значительные колебания температуры окружающей человека среды и собственной теплопродукции организма. Известно, что основными параметрами, влияющими на терморегуляцию организма человека, температура и относительная влажность воздуха, именно они определяют эффективность отвода тепла. Продолжительное влияние неблагоприятных сочетаний температуры и относительной влажности будет приводить к накоплению в организме тепловой нагрузки и затруднению терморегуляции [82]. Таким образом, для обеспечения безопасных условий труда важно знать уровень накопленной организмом работника тепловой нагрузки.



В качестве критерия, отражающего воздействие нагревающего микроклимата на работников и оборудование предлагается использовать индекс ТНС, который в отличие от принятого к нормированию показателя «температура воздуха», характеризует комплексное воздействие факторов микроклимата и учитывает температуру воздуха, температуру поверхностей ограждающих конструкций, а также технологического оборудования или ограждающих его устройств, относительную влажность воздуха, скорость движения воздуха и интенсивность теплового облучения.

Определение величины ТНС-индекса производится путем расчета по формуле:

$$\text{ТНС} = 0,7 \cdot t_{\text{вл}} + 0,3 \cdot t_{\text{сух}},$$

где  $t_{\text{вл}}$  – температура воздуха по влажному термометру, °С;

$t_{\text{сух}}$  – температура воздуха по сухому термометру, °С.

Оценка условий труда согласно действующим Санитарным нормам и правилам «Гигиеническая классификация условий труда» [70] в Республике Беларусь основана на определении среднесменного ТНС-индекса.

Зависимость вредности условий труда от значения индекса ТНС и категории энерготрат представлена в приложении № 13 к приказу № 33н «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда» (таблица 4.1)

Таблица 4.1 — Отнесение условий труда по классу (подклассу) условий труда в зависимости от величины ТНС-индекса

Категория работ	Класс условий труда					
	Допустимый	Вредный				Опасный
		2	3.1	3.2	3.3	
Ia	<26,5	26,5 - 26,6	26,7 - 27,4	27,5 - 28,6	28,7 - 31,0	>31,0
Iб	<25,9	25,9 - 26,1	26,2 - 26,9	27,0 - 27,9	28,0 - 30,3	>30,3
IIa	<25,2	25,2 - 25,5	25,6 - 26,2	26,3 - 27,3	27,4 - 29,9	>29,9
IIб	<24,0	24,0 - 24,2	24,3 - 25,0	25,1 - 26,4	26,5 - 29,1	>29,1
III	<21,9	21,9 - 22,0	22,1 - 23,4	23,5 - 25,7	25,8 - 27,9	>27,9

Согласно пункту 19 Санитарных норм и правил «Требованиях к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях» [69] указано, что «ТНС-индекс следует использовать для интегральной оценки тепловой нагрузки среды на рабочих местах, на которых скорость движения воздуха не превышает 0,6 м/с, а интенсивность теплового облучения – менее 1200 Вт/м<sup>2</sup>. При этом в документе не приводится, какими параметрами следует руководствоваться вне приведенных ограничений. И несмотря на то, что формально данный документ не регламентирует условия для калийных рудников, а в действующих на калийных рудниках

Санитарных норм, правилах и гигиенических нормативах «Гигиенические

требования к микроклимату при проектировании и эксплуатации калийных рудников» [71] и санитарных нормах и правилах «Гигиеническая классификация условий труда» [70] данных ограничений нет, требует рассмотрения вопрос возможных ограничений применения ТНС-индекса для исследуемого диапазона параметров.

В работе [44] сотрудников Республиканского унитарного предприятия «Научно-практический центр гигиены» затрагивается вопрос об оценке условий труда при скоростях воздуха выше 0,6 м/с и возможностях применения ТНС-индекса в них. Указано, что ограничениями метода оценки индекса тепловой нагрузки среды являются скорость движения воздуха выше 0,6 м/с и/или относительная влажность воздуха менее 15%, что обуславливается снижением корреляции тепловой нагрузки внешней среды с теплоощущением работника. В то же время, по мнению авторов работы, считается нецелесообразным ограничение применения метода оценки ТНС-индекса при повышенных уровнях ИК-потока.

Однако в данной и других работах авторов не приводятся доказательства приведенных утверждений.

В связи с этим выполнен поиск исследований, объясняющих данные ограничения применимости ТНС-индекса в зависимости от скорости движения воздуха и интенсивности теплового излучения.

Так, в работе [127] на примере нагревающего микроклимата нефтешахт приведены результаты сравнительного исследования ТНС-индекса и эффективной температуры воздуха при различных сочетаниях температур воздуха по сухому и влажному термометрам, скоростях движения воздуха. В результате установлено, что с увеличением скорости движения ТНС-индекс не меняется и не позволяет учитывать дополнительные потери тепла организмом за счет интенсификации конвективного теплообмена.

Выполним аналогичные расчеты для условий горных выработок калийного рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий».

На основании проведенных измерений параметров микроклимата установлены диапазоны изменения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочих зонах очистных и подготовительных забоев, представленные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Диапазоны параметров микроклимата в рабочих зонах очистных и подготовительных забоев

Температура воздуха, °С	20 – 35
-------------------------	---------

Относительная влажность воздуха, %	30 – 45
Скорость движения воздуха, м/с	0,1 – 3,0

Для указанных условий получены зависимости изменения величины ТНС-индекса и эффективной температуры ЕТ от скорости движения воздуха. Результаты представлены на рисунке 4.2

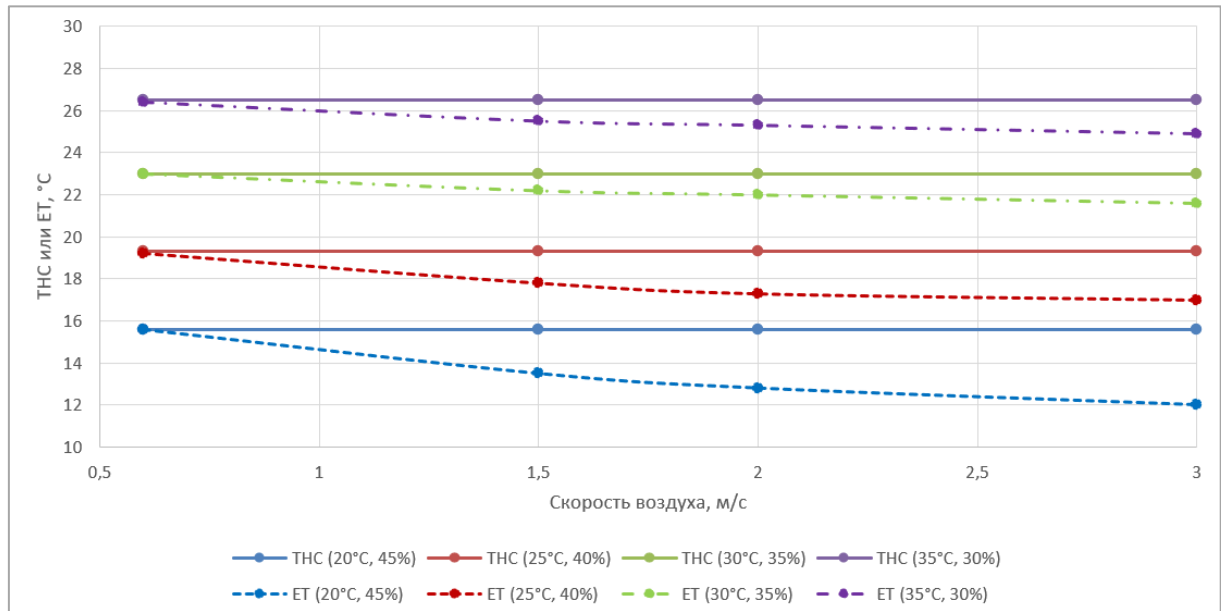


Рисунок 4.2 — Зависимость ТНС-индекса и эффективной температуры от скорости воздуха для разных микроклиматических условий

Аналогичный вывод о неявном учете скорости воздуха при определении WBGT (аналог ТНС-индекса за рубежом) приведен в классическом труде Malcolm J. McPherson [127].

Таким образом, применение ТНС-индекса при скорости более 0,6 м/с дает несколько завышенные значения условий труда по фактору микроклимата, что обеспечивает технический запас при оценке условий.

Однако с учетом того, что согласно действующей на калийных рудниках Республики Беларусь нормативной документации применение ТНС-индекса регламентируется для оценки условий труда по фактору микроклимата без указания дополнительных ограничений, в дальнейшем в рамках исследования применяется именно этот параметр.

В рамках выполнены исследования микроклиматических параметров воздуха (температура воздуха по сухому термометру, относительная влажность воздуха) с учетом пространственной и временной динамики микроклиматических параметров. Измерения параметров рудничной атмосферы производились в местах нахождения работников в течение рабочей смены для наиболее неблагоприятных условий,

характеризуемых максимальным влиянием тепловыделяющих источников на температуру воздуха (добычная смена). Кроме этого, в рамках программы исследовались физиологические параметры (ЧСС) подземных рабочих.

Общие энерготраты организма определялись по формуле:

$$Q = 4 \cdot \text{ЧСС} - 255,$$

где  $Q$  – общие энерготраты организма, [Вт/м<sup>2</sup>];

ЧСС – среднесменная частота сердечных сокращений, определяемая как средневзвешенная величина с учетом времени, затраченного на выполнение различного вида работ и отдых, [уд/мин].

Для оценки нагревающего микроклимата использовался интегральный показатель – тепловая нагрузка среды (ТНС-индекс).

Температура воздуха по влажному термометру рассчитывалась на основании I-d диаграммы влажного состояния воздуха.

Средневзвешенный ТНС-индекс для каждой исследуемой профессии равен:

$$\overline{\text{ТНС}} = \frac{\text{ТНС}_1 \cdot \tau_1 + \text{ТНС}_2 \cdot \tau_2 + \dots + \text{ТНС}_i \cdot \tau_i}{\sum \tau},$$

где  $\tau_i$  – время, на протяжении которого сохранялись данные температурно-влажностные показатели микроклимата рабочего места работника.

Для обеспечения запаса принято, что категория энергозатрат работников максимальная.

Далее путем соотнесения установленной категории работ и значения среднесменного значения ТНС-индекса устанавливался класс условий труда согласно таблице 4.1.

Результаты оценки условий труда представлены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Результаты исследования условий труда по фактору «микроклимат» подземных рабочих очистных забоев рудника 4 РУ

Название забоя	Профессия	Категория работ	ТНС <sub>ср.см.</sub> , °С	Класс условий труда
Лава №4-7	МГВМ	III	19,5	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	19,5	2 (допустимый)
Лава №4-1	МГВМ	III	20,2	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	20,4	2 (допустимый)
Лава №4-2	МГВМ	III	20,1	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	20,3	2 (допустимый)
Лава №4-8	МГВМ	III	20,4	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	20,4	2 (допустимый)
Лава №4-5	МГВМ	III	19,9	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	19,8	2 (допустимый)
Лава №4-3	МГВМ	III	19,6	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	19,9	2 (допустимый)
Лава №4-4	МГВМ	III	20,7	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	20,5	2 (допустимый)
Лава №4-9в	МГВМ	III	19,9	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	20,0	2 (допустимый)
Лава №4-13в	МГВМ	III	19,4	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	19,1	2 (допустимый)
Лава №4-15в	МГВМ	III	19,3	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	19,3	2 (допустимый)
Лава №4-12	МГВМ	III	19,6	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	19,6	2 (допустимый)
Лава №4-11	МГВМ	III	20,6	2 (допустимый)
	ГРОЗ	III	20,7	2 (допустимый)
Лава №4-10в	МГВМ	III	22,0	3.1 (вредный)
	ГРОЗ	III	21,9	3.1 (вредный)

В рамках исследований установлено, что несмотря на локальные превышения температур в очистных забоях (прежде всего участок энергопоезда) условия труда большинства исследуемых работников (24 из 26) попадают под допустимый класс условий труда. Это связано с тем, что воздух после нагрева от энергопоезда, активно отдает тепло массиву в забое лавы, в результате чего его температура при движении по лаве снижается и стремится к температуре нетронутого породного массива. Специфика ведения работ обуславливает необходимость нахождения работников в забое лавы большую часть смены, в результате чего среднесменная тепловая нагрузка существенно ниже области локальных превышений температур.

Полученный результат является наиболее точной оценкой испытываемой тепловой нагрузки поскольку отражает все изменения микроклиматических параметров в соответствии с реальной картиной. При этом он обладает следующими недостатками:

- отсутствует возможность прогноза тепловой нагрузки;

- отсутствует возможность моделирования мероприятий, направленных на снижение тепловой нагрузки.

#### **4.2 Расчет распределения температуры в длинном очистном забое**

Для прогноза тепловой нагрузки как в действующих, так и в перспективных рабочих зонах предлагается использовать динамическую модель, разработанную в разделе 3. Ниже представлен пример расчета тепловой нагрузки, испытываемой работником длинного очистного забоя при работе в добычные и ремонтную смены.

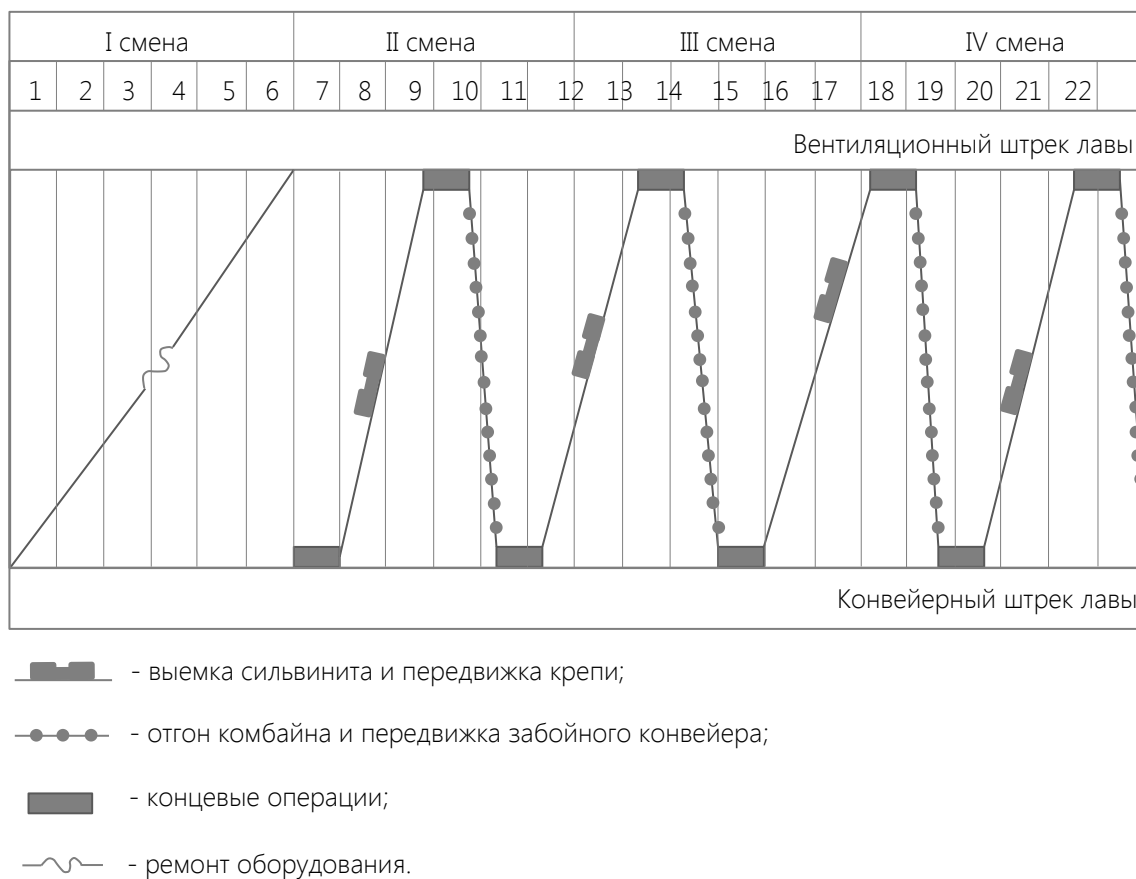
Использование разработанной модели позволяет учитывать:

- сочетанное влияние параметров микроклимата на оказываемую тепловую нагрузку;
- нестационарный/сопряженный теплообмен с массивом;
- протяженность тепловыделяющего оборудования в пространстве выработки;
- нестационарный характер работы тепловыделяющего оборудования;
- изменение параметров микроклимата в местах пребывания работников, обусловленные их перемещениями в течение рабочей смены.

Расчет тепловой нагрузки, испытываемой работниками, предлагается осуществлять в два этапа:

1. расчет распределения температур воздуха по всей длине длинного очистного забоя для продолжительности всей смены;
2. расчет среднесменного значения ТНС-индекса на основании полученного распределения температур и данных о местонахождении работников в течение рабочей смены.

Планирование работ в очистных забоях осуществляется при помощи планограмм. Для составления планограммы выделяются основные процессы, осуществляемые в забое: выемка соли, передвижение секций крепления, подвигание конвейера, отгон комбайна, ремонт оборудования, работы выполняемые на сопряжении лавы с энергопоездом. Для каждого процесса определяется его продолжительность. Пример планограммы представлен на рисунке 4.3.



**Рисунок 4.3 — планограмма работы очистного забоя**

Для определения режимов работы оборудования, а также изменения местоположения работников в течение рабочей смены предлагается использовать планограммы исследуемых забоев.

На рисунке 4.4 представлен пример расчета распределения параметров микроклимата в длинном очистном забое лавы №4-10в для четырех рабочих смен (ремонтная и три последующие добычные смены) выполненный на основании модели, разработанной в разделе 3 работы.

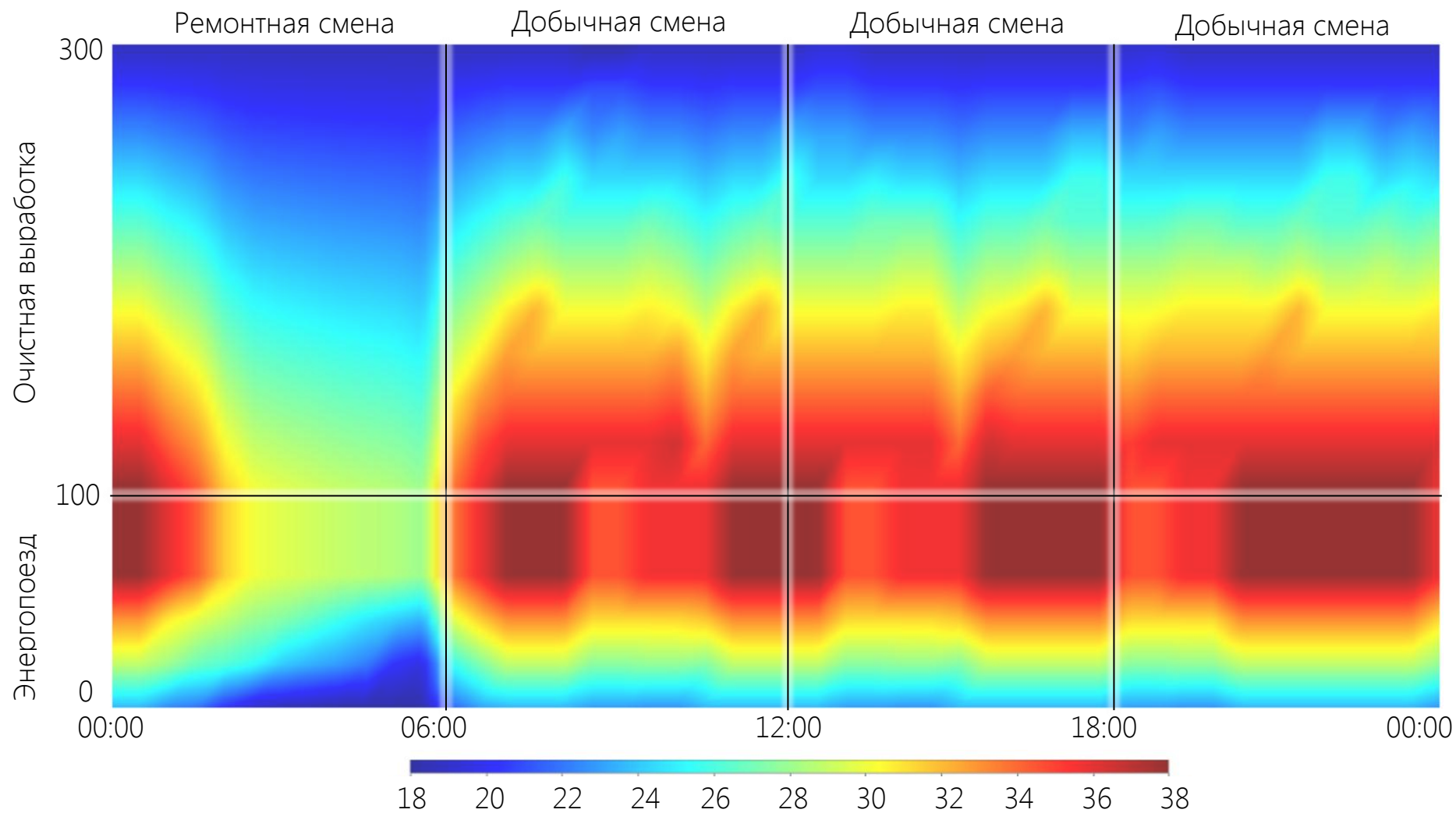


Рисунок 4.4 — Распределение температур воздуха в длинном очистном забое лавы № 4-10в



На рисунке 4.5 представлен результат совмещения планограммы лавы №4-10в, с полученным распределением температур и рассчитанные величины тепловой нагрузки.

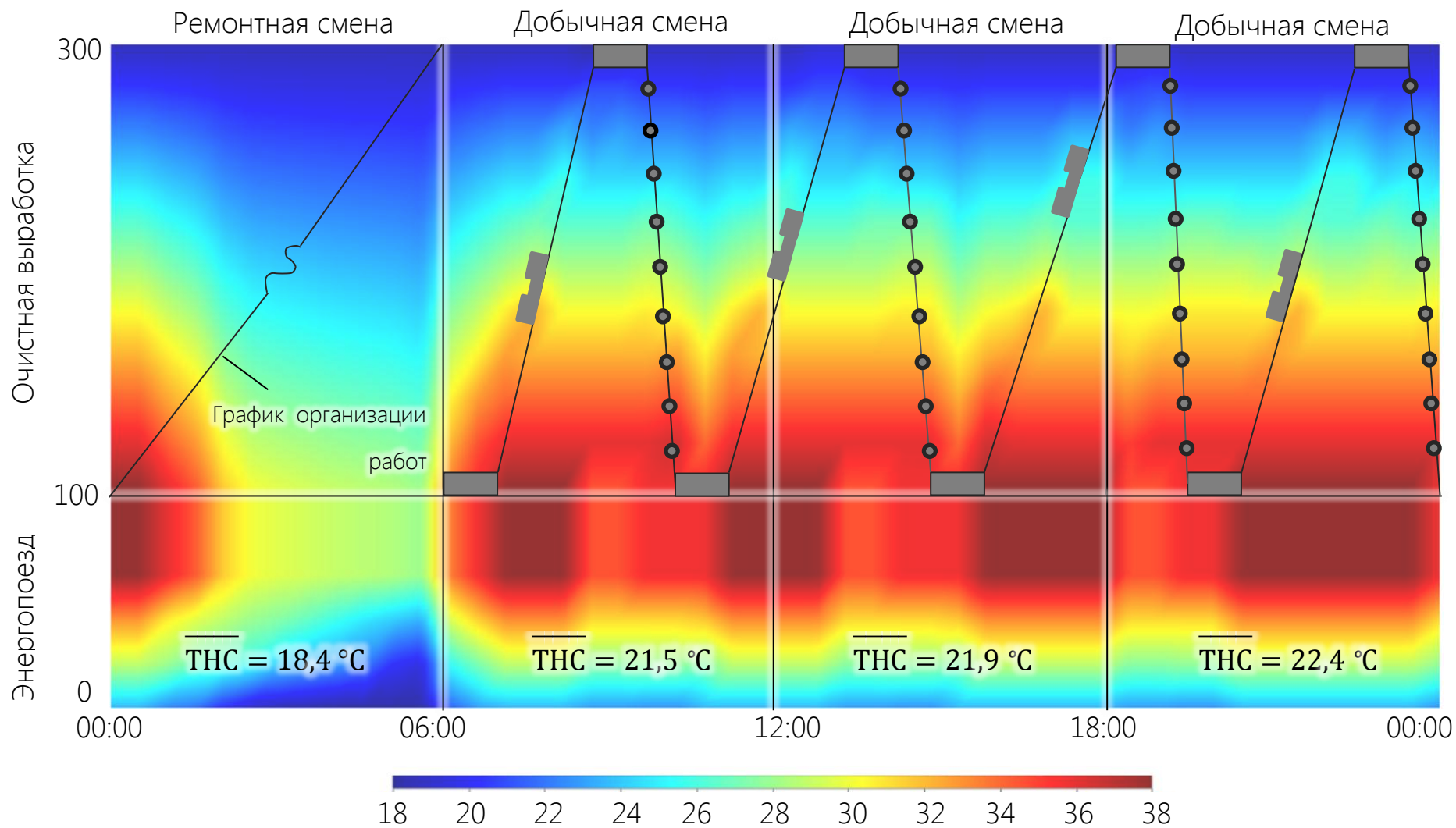


Рисунок 4.5 — Расчет тепловой нагрузки МГВМ лавы № 4-10в

Согласно таблице 4.1 полученные значения среднесменных индексов ТНС исключают возникновение опасных условий труда по фактору «микроклимат». Ремонтная смена характеризуется допустимыми условиями. Добычная смена, следующая после ремонтной, также характеризуется допустимыми условиями, что объясняется остыванием оборудования за время ремонтной смены и как следствие более благоприятными микроклиматическими параметрами в начальный момент добычной смены. В последствие продолжительная работа оборудования приводит к ухудшению микроклиматических параметров и ухудшению условий до вредных значений во вторую и третью добычные смены.

В таблице 4.4 выполнено сравнение значений среднесменных значений ТНС, рассчитанных при помощи трех разных способов:

1. По значениям непрерывных измерений приборами, закрепленными на работах.
2. На основании разработанной математической модели.
3. На основании измерений в замерном пункте с наиболее неблагоприятной температурой.

Таблица 4.4 – Сравнение значений среднесменных ТНС, определенных различными подходами

Система измерений	Очистной	
	ГРОЗ	МГВМ
Непрерывные измерения прибором	21,9	22,0
Расчет на динамической модели (добычная смена №3)	22,3 (+0,4)	22,4 (+0,4)
Оценка по замерному пункту с наибольшей температурой	25,0 (+3,1)	25,0 (+3,0)

Согласно полученным результатам установлено, что условия труда работников, определенные путем непосредственных измерений среднесменного ТНС-индекса при оборудовании работников датчиками непрерывного контроля параметров микроклимата, а также по результатам измерения уровня энерготрат при оборудовании работников датчиками контроля физиологических параметров, попадают по фактору микроклимата в класс условий труда 3.1 вредный.

Небольшие значения среднесменного ТНС-индекса обеспечивается низкой относительной влажностью воздуха и временным пребыванием рабочих в зонах наибольших температур.

Оценка ТНС-индекса по максимальному значению в пределах рабочих зон соответствует вредному классу условий труда 3.3, но не является корректной, так как

рабочие находятся на этих рабочих участках только небольшую часть времени. Указанный способ оценки имеет существенные расхождения с результатами, полученными в рамках непрерывных измерений (наиболее точный способ).

Расчет на разработанной динамической модели в целом дает точную оценку ТНС-индекса. Модель может быть использована как для прогноза тепловой нагрузки в перспективных рабочих зонах, так и для оценки уровня тепловой нагрузки в существующих забоях без необходимости оборудования работников средствами измерения параметров микроклимата.

Для эффективного управления тепловым режимом необходимо разработать алгоритм комплексирования организационных и технических мероприятий, который будет исключать возможность снижения концентрации работников вследствие воздействия нагревающего микроклимата, сохранять их здоровье и обеспечивать безаварийную работу используемого оборудования при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.

#### **4.3 Алгоритм комплексирования организационных и технических мероприятий**

Установленный ранее критерий управления тепловым режимом рассчитывается на основании температуры воздуха по сухому и влажному термометрам. При этом температура воздуха по влажному термометру отражает температуру, до которой требуется охладить воздух с температурой  $t_{\text{сух}}$  для того, чтобы он стал насыщенным при сохранении начальной энтальпии воздуха. Определение величины может быть осуществлено на основании I-d диаграммы состояния влажного воздуха при известной температуре воздуха по сухому термометру (далее температура) и относительной влажности воздуха.

Тогда значение ТНС индекса в конкретный момент времени может быть рассчитано на основании температуры и относительной влажности воздуха. Для определения накопленной тепловой нагрузки необходимо дополнительно знать время воздействия данных параметров.

Таким образом для оценки предлагается использовать интеграл по времени, зависящий от температуры и влажности воздуха имеющий вид:

$$\int_0^t [0,7 \cdot t_{\text{вл}}(t_{\text{сух}}, \varphi) + 0,3 \cdot t_{\text{сух}}] dt$$

На начальном этапе предлагается ограничить возможность возникновения у работников тепловых ударов и аварийных остановок оборудования путем определения верхней границы интеграла.

Категория работ разграничивает работы по тяжести на основании общих энергозатрат организма. Во избежание воздействия на работников опасных условий по тепловому фактору устанавливается предельное значение среднесменного ТНС-индекса равное 25,7, что соответствует классу условий труда 3.3 – вредный при категории работ III (принимается максимальным для запаса). Данное требование позволяет не попадать под опасный класс условий труда и обеспечивать запас в качестве класса условий труда 3.4.

Тогда параметры микроклимата в рабочих зонах на протяжении всей смены должны удовлетворять выражению:

$$\text{ТНС}_{\text{р.з.}} = 0,7 \cdot t_{\text{вл}} + 0,3 \cdot t_{\text{сух}} \leq 25,7^{\circ}\text{C},$$

Во избежание возникновения аварийных ситуаций, вызванных снижением концентрации работников, дополнительно устанавливается требование к среднесменной тепловой нагрузке, испытываемой работником. Ее величина должна соответствовать допустимым условиям труда при максимальной категории работ согласно таблице 4.1.

$$\int_0^t [0,7 \cdot t_{\text{вл.}}(t_{\text{сух}}, \varphi) + 0,3 \cdot t_{\text{сух}}] dt \leq 21,9^{\circ}\text{C}$$

Рассмотрим изменение параметров микроклимата в длинном очистном забое калийного рудника в течение смены.

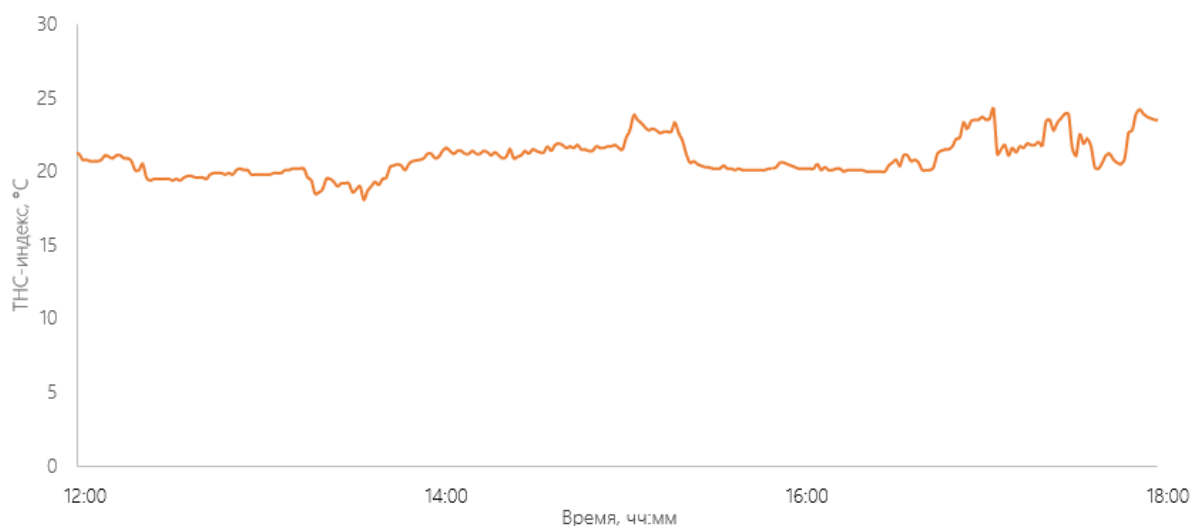


Рисунок 4.6 — Изменение ТНС-индекса в длинном очистном забое за смену

Фактически рассмотренный ранее интеграл, описывающий накопление тепловой нагрузки, представляет собой площадь закрашенной фигуры. А задача снижения величины накопленной тепловой нагрузки сводится к уменьшению площади закрашенной фигуры. Этого можно достигнуть путем снижения высоты либо ширины фигуры. В первом случае необходимо улучшать параметры микроклимата в рабочей

зоне, а во втором снижать время пребывания в неблагоприятных микроклиматических условиях.

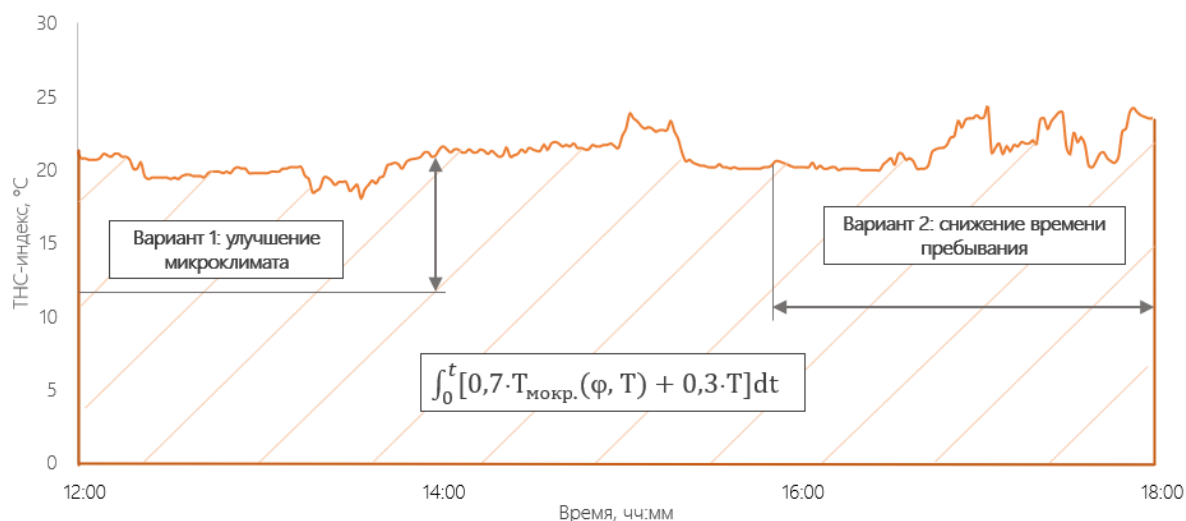


Рисунок 4.7 — Управление тепловой нагрузкой

При расчете среднесменного ТНС-индекса необходимо учитывать изменения параметров микроклимата вызванные:

- перемещением работника в течение смены;
- нестационарным/сопряженным теплообменом воздуха с массивом;
- протяженностью тепловыделяющего оборудования в пространстве выработки;
- нестационарным характером работы тепловыделяющего оборудования.

Учета последних трех факторов осуществляется на основании модели, разработанной в главе 3 диссертационной работы.

Данные о местонахождении работников в течение рабочей смены могут быть получены на основании фотографий рабочего дня, составленной по результатам аттестации рабочих мест либо на основании планограммы.

В случае если рассчитанные параметры микроклимата в рабочей зоне создают опасные условия, работы должны быть запрещены и единственным возможным мероприятием является улучшение параметров микроклимата за счет использования систем кондиционирования воздуха.

В остальных случаях работа может быть разрешена, но при условии поддержания допустимого уровня теплового стресса в организме работников. Для реализации мероприятий по снижению тепловой нагрузки на рисунке 4.8 предложен алгоритм комплексирования организационных и технических мероприятий, составленный по критерию минимизации затрат на реализацию. На начальном этапе выполняется прогнозный расчет фактического уровня тепловой нагрузки и происходит сравнение с

предельным значением. В случае если рассчитанное значение ниже предельного, достаточно ограничиться контролем микроклимата в рабочей зоне. Если значение превышает предельное, то необходима реализация мероприятий, направленных на снижение накопленной тепловой нагрузки.

При разработке мероприятий рассматриваются 3 варианта:

1. Регламентированный режим работы и отдыха (оборудование зон отдыха).
2. Ротация рабочих мест.
3. Кондиционирование воздуха в рабочих зонах выработок.

С целью минимизации затрат на реализацию мероприятий на начальном этапе проводится анализ всех возможных вариантов обеспечения благоприятных условий труда с учетом только управления временем нахождения работников в нагревающем микроклимате. При наличии выработок с допустимыми параметрами микроклимата в непосредственной близости к длинному очистному забою наиболее простым с точки зрения реализации мероприятием будет оборудование ниш для отдыха и приемов пищи в данных выработках. Время отдыха в нишах должно рассчитываться из условия соответствия среднесменной тепловой нагрузки допустимым условиям.

Если такие выработки отсутствуют, необходимо разрабатывать решения по организации мест отдыха оборудованных СКВ (камеры отдыха подробнее рассмотрены в разделе 4.4.1) либо решения по ротации рабочих между забоями (см. раздел 4.4.2). Среди разработанных мероприятий выбирается наиболее экономичное с точки зрения капитальных и эксплуатационных затрат. В случае если рассчитанные режимы работы существенно снижают производительность труда и требуют расширения штата сотрудников, необходимо разрабатывать СКВ.

Кроме того, для повышения безопасности ведения работ во всех без исключения выработках необходимо реализовывать комплекс организационных мероприятий:

1. Плановое проведение температурных съемок.
2. Контроль микроклиматических параметров.
3. Использование СИЗ.
4. Прохождение диспансеризации в соответствии с установленными сроками.

Ежесменный контроль ТНС-индекса может осуществляться двумя способами:

1 способ: замеры влажности и температуры воздуха по сухому термометру, а также времени, на протяжении которого сохранялись данные температурно-влажностные показатели микроклимата рабочего, с последующим расчетом

температуры влажного термометра на основании I-d диаграммы и расчетом среднесменного ТНС-индекса.

Контроль за микроклиматическими параметрами осуществляется автоматически. Для этого подземные работники, попавшие по результатам оценки условий труда под класс вредный 3.3 и выше, оснащаются беспроводными записывающими устройствами для определения температуры и влажности KESTREL D2 либо аналогами. Устройство позволяет фиксировать изменение температурно-влажностных параметров воздуха в течение всей смены, а после извлекать полученные данные путем соединения с компьютером.

На основании полученного за смену массива данных, лицами на которых возложены данные обязанности, осуществляется расчет средневзвешенных ТНС-индексов с последующим пересчетом на среднесменный ТНС-индекс по каждой из профессий.

2 способ: использование прибора, позволяющего отслеживать, а также вести запись изменений ТНС-индекса, а также физиологических параметров работника (ЧСС).

В качестве измеряемых прибором величин выступают температура сухого термометра и влажность воздуха. Температура влажного термометра вычисляется согласно зависимостям, представленным в I-d диаграмме.

Прибор отображает значение ТНС-индекса для текущих условий, а также производит запись данных в память и вычисляет среднесменное значение ТНС-индекса. Подземные работники, попавшие по результатам оценки условий труда под класс вредный 3.1 и выше, перед началом выполнения работ должны произвести замер ТНС-индекса. В случае, если значение ТНС-индекса в месте выполнения работ превышает величину  $25.7^{\circ}\text{C}$  (при категории энерготрат III), для данного работника устанавливается регламентированный режим работы.

Использование второго способа предпочтительнее, поскольку позволяет осуществлять контроль тепловой нагрузки в реальном времени. Однако на сегодняшний день на рынке отсутствуют приборы, отвечающие указанным выше требованиям. В связи с этим в разделе 4.5 представлены технические требования для разработки средства измерения микроклиматических параметров воздуха и физиологических параметров работников.



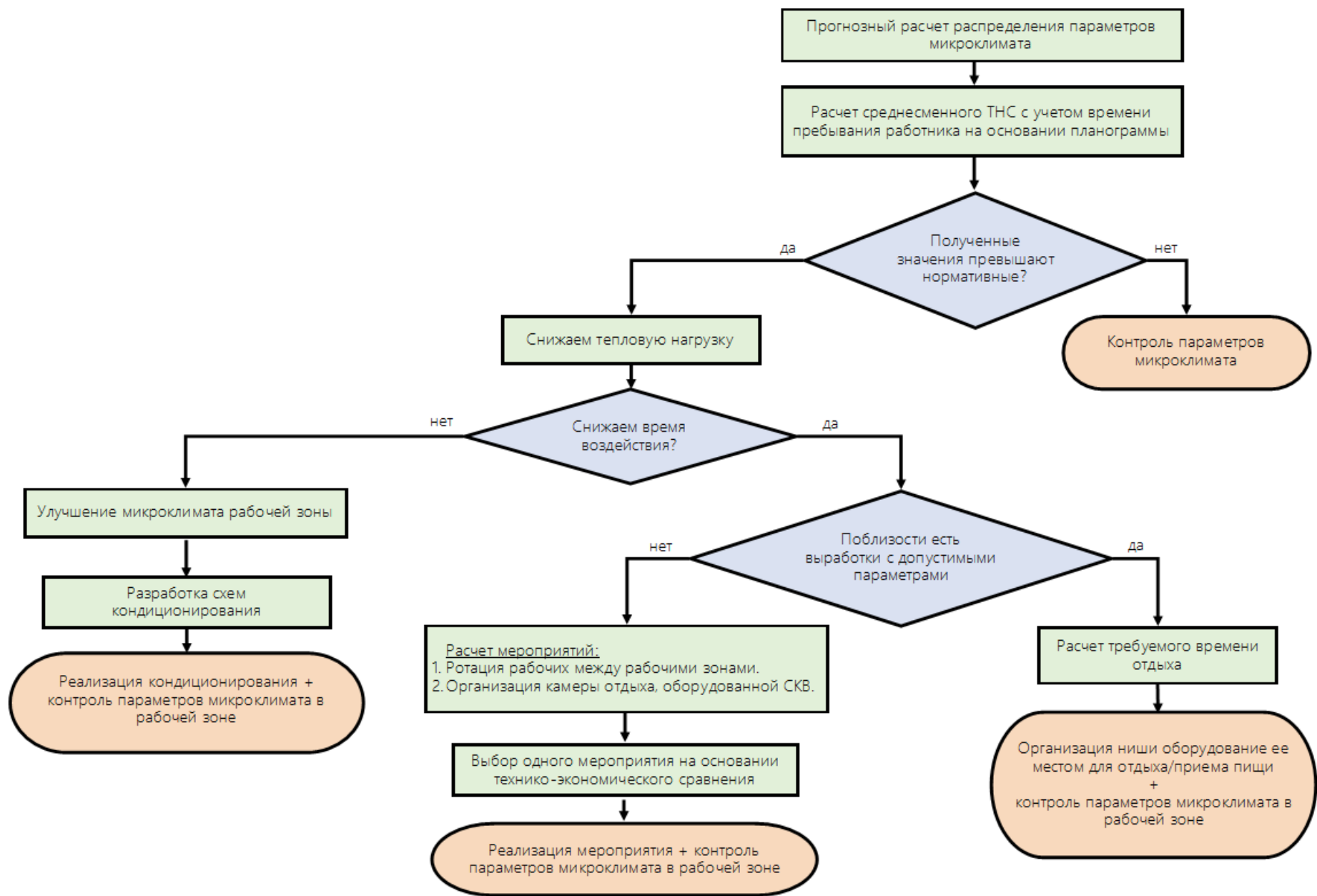


Рисунок 4.8 — Порядок выбора мероприятий, направленных на снижение влияния нагревающего микроклимата

#### 4.4 Мероприятия по нормализации микроклимата

В разделе на примере микроклиматических условий длинного очистного забоя лавы №4-10в рассмотрен комплекс организационных и технических мероприятий, направленный на управление тепловой нагрузкой.

На рисунке 4.9 представлены результаты расчета тепловой нагрузки МГВМ лавы №4-10в для добычной смены №3 (обладает наиболее неблагоприятными микроклиматическими условиями).

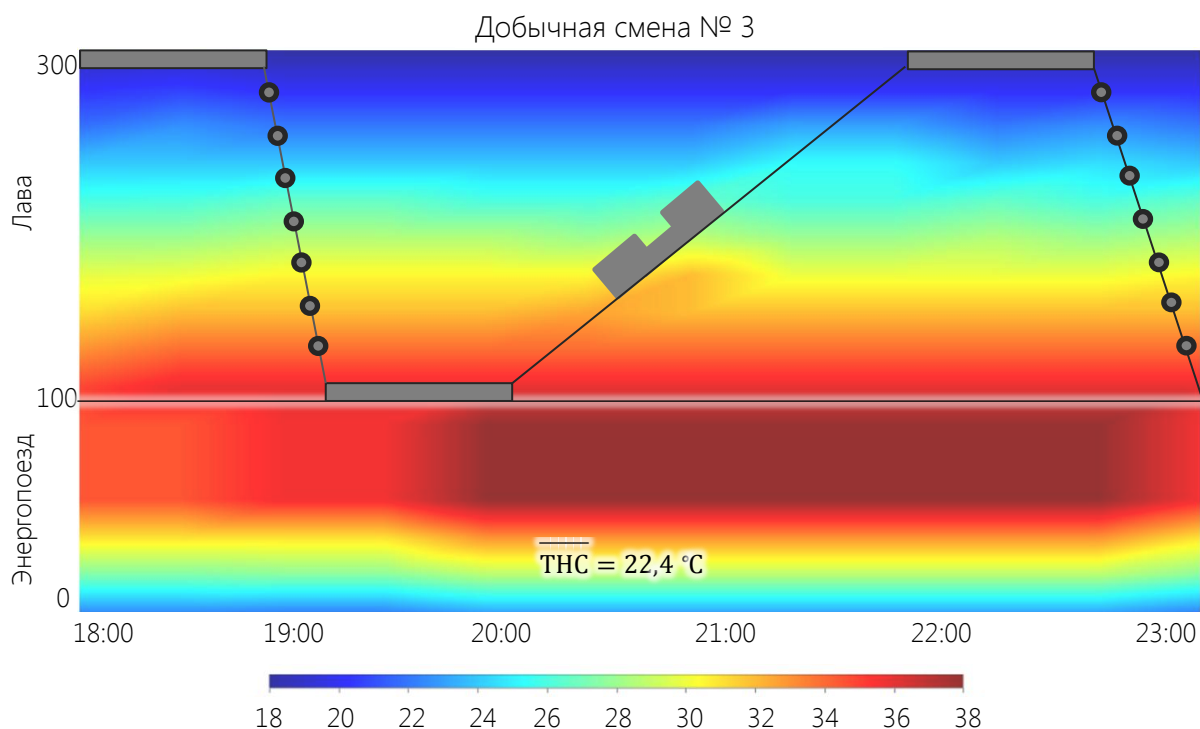


Рисунок 4.9 — Расчет тепловой нагрузки МГВМ лавы № 4-10в

Рассчитанное значение среднесменной тепловой нагрузки соответствует вредным условиям и требует снижения. В целях управления тепловой нагрузкой в разделе рассмотрены 3 варианта:

1. Регламентированный режим работы и отдыха (оборудование зон отдыха).
2. Ротация рабочих мест.
3. Кондиционирование воздуха в рабочих зонах выработок.

##### 4.4.1 Регламентированный режим работы и отдыха

Мероприятие заключается в снижении среднесменной температуры воздуха в местах пребывания работника за счет рационального изменения режимов труда и отдыха работников.

Отдых работников должен проходить в выработках с допустимыми параметрами микроклимата.

В связи с этим целесообразно организовать ниши в транспортном штреке и размещать в них места для приема пищи и заполнения сменных журналов, либо использовать для этих целей технологические сбойки. Пример предлагаемого места размещения представлен на рисунке 4.10.

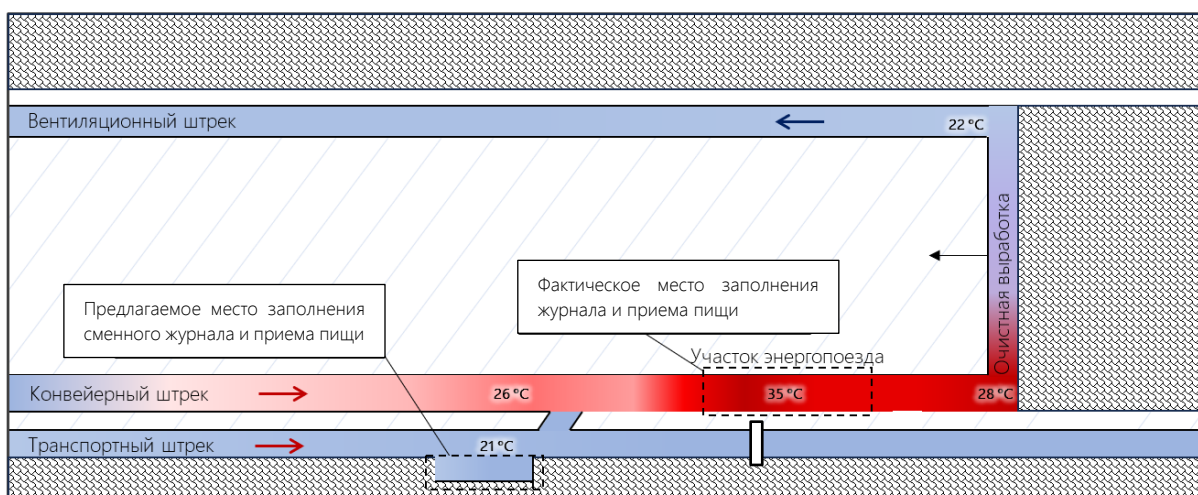


Рисунок 4.10 — Предлагаемое место приема пищи и заполнения сменного журнала

В случае если параметры микроклимата в указанном месте соответствуют допустимым, в них также при необходимости можно осуществляться отдых работников. В иных случаях необходимо организовывать камеры отдыха, оборудованные системами кондиционирования.

Камера Отдыха Персонала (КОП) служит в качестве специально оборудованного места для отдыха горнорабочих при работе в условиях неблагоприятного теплового режима. КОП – сборное помещение контейнерного типа, устанавливаемое в горных выработках (в технологической сбойке или в подготовленной нише) и рассчитанное на быстрый демонтаж с целью транспортирования вслед за горными работами.

В качестве такой камеры возможно использование камеры отдыха персонала производства ООО «НПО «АэроСфера».

Камера ООО «НПО «АэроСфера» рассчитана на пребывание до 6 человек и оборудована взрывозащищенной системой кондиционирования, способной обеспечивать благоприятный микроклимат внутри камеры, с температурами от +18 до +26 °С при температуре окружающей среды до +55 °С. Встроенный воздухопровод равномерной раздачи обеспечивает распределение охлажденного воздуха по всей камере. Разработанная камера может служить в качестве специально оборудованного места для отдыха персонала при работе в условиях неблагоприятного теплового режима,

а также в качестве камеры аварийного воздухообмена (КАВС), предназначенной для переключения людей в новые изолирующие самоспасатели или укрытия до окончания ликвидации.

Возможность установки камер видеонаблюдения и телефонов обеспечивает связь с диспетчером по кабелю или через Wi-Fi антенну, а система контроля доступа и учета людей в помещении, газоанализаторы и сигнализация – безопасность находящегося внутри персонала и контроль готовности и состояния оборудования.

Эти камеры представляют собой ключевой элемент системы аварийной готовности и являются частью мер по обеспечению безопасности труда подземных выработках. На рисунках 4.11 – 4.12 представлены фотографии типовой КОП.

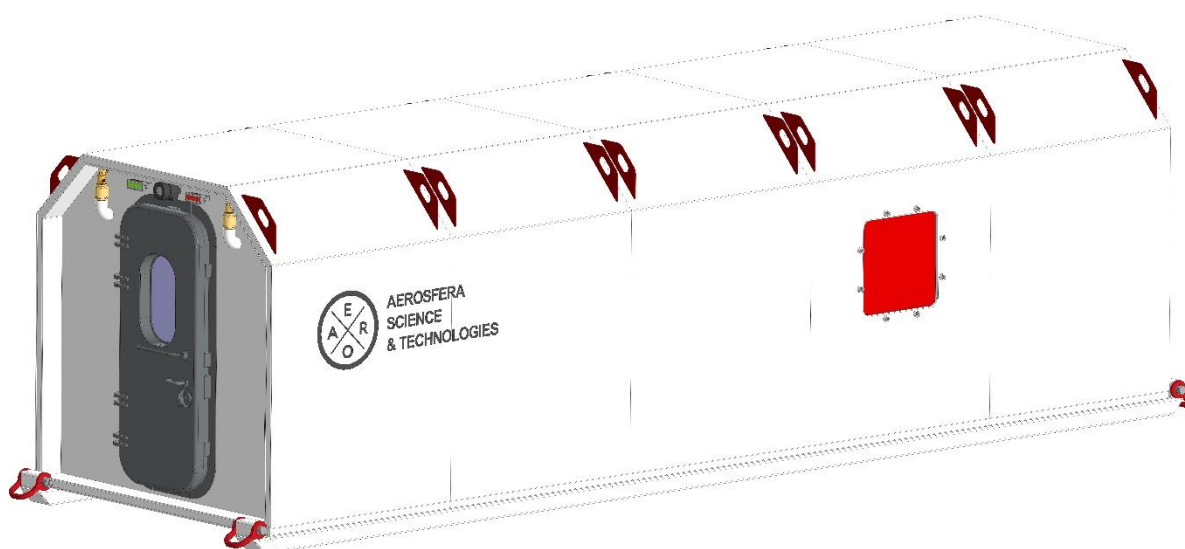


Рисунок 4.11 — КОП – вид снаружи

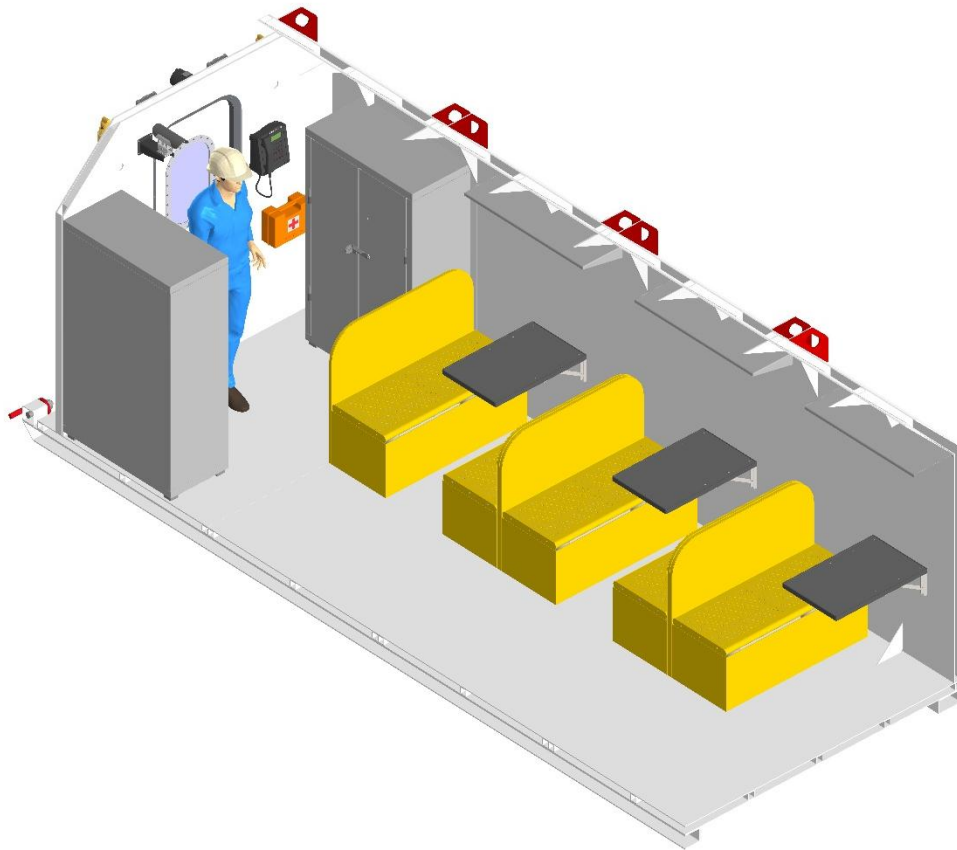


Рисунок 4.12 — КОП – вид изнутри

Камеры должны быть оборудованы вентиляцией, освещением, местами для сидения, аптечками, емкостями с питьевой водой, возможностью приема пищи. Необходимо предусмотреть обеспечение работников запасным комплектом специальной одежды и автоматический контроль параметров микроклимата в камерах. Время пребывания в камерах определяется в зависимости от температурных условий.

Выполним расчет требуемого времени отдыха для рассматриваемого забоя.

Пусть параметры микроклимата в месте отдыха соответствуют допустимым значениям ( $t_{\text{сух.}}=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_{\text{м.о.}}=30\%$ ).

Температура воздуха по влажному термометру в месте отдыха ( $t_{\text{вл.}}$ ) может быть рассчитана по формуле:

$$t_{\text{вл.}} = (0,00381\varphi + 0,636) \cdot t_{\text{сух.}} + 0,05461\varphi - 4 \cdot (0,01\varphi - 0,5)^2 - 4,94$$

$$t_{\text{вл.}} = (0,00381 \cdot 30 + 0,636) \cdot 23 + 0,05461 \cdot 30 - 4 \cdot (0,01 \cdot 30 - 0,5)^2 - 4,94 = 16,6\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Значение ТНС в месте отдыха рассчитывается по формуле:

$$\text{ТНС} = 0,7 \cdot t_{\text{вл.}} + 0,3 \cdot t_{\text{сух.}}$$

$$\text{ТНС}_{\text{м.о.}} = 0,7 \cdot 16,6 + 0,3 \cdot 23,0 = 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Для расчета требуемого времени отдыха необходима решить систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} \overline{\text{ТНС}} = \frac{\text{ТНС}_{\text{р.з.}} \cdot \tau_{\text{р.з.}} + \text{ТНС}_{\text{м.о.}} \cdot \tau_{\text{м.о.}}}{\tau_{\text{р.з.}} + \tau_{\text{м.о.}}} \\ \tau_{\text{р.з.}} + \tau_{\text{м.о.}} = \tau_{\text{см.}} \end{cases}$$

где  $\overline{\text{ТНС}}$  — среднесменная тепловая нагрузка в местах пребывания работника, соответствующая допустимым условиям, принимается равной 21,8 °С;  $\text{ТНС}_{\text{р.з.}}$  — тепловая нагрузка в рабочей зоне, принимается равной 22,4 °С;  $\text{ТНС}_{\text{м.о.}}$  — тепловая нагрузка в месте отдыха, принимается равной 18,5 °С;  $\tau_{\text{р.з.}}$  — продолжительность работы, мин;  $\tau_{\text{м.о.}}$  — продолжительность отдыха, мин;  $\tau_{\text{см.}}$  — продолжительность смены, принимается равной 360 мин.

По результатам расчета для указанных условий продолжительность отдыха работника должна составлять не менее 55 минут.

Результаты расчета среднесменной тепловой нагрузки при регламентированном режиме работы представлены на рисунке 4.13.

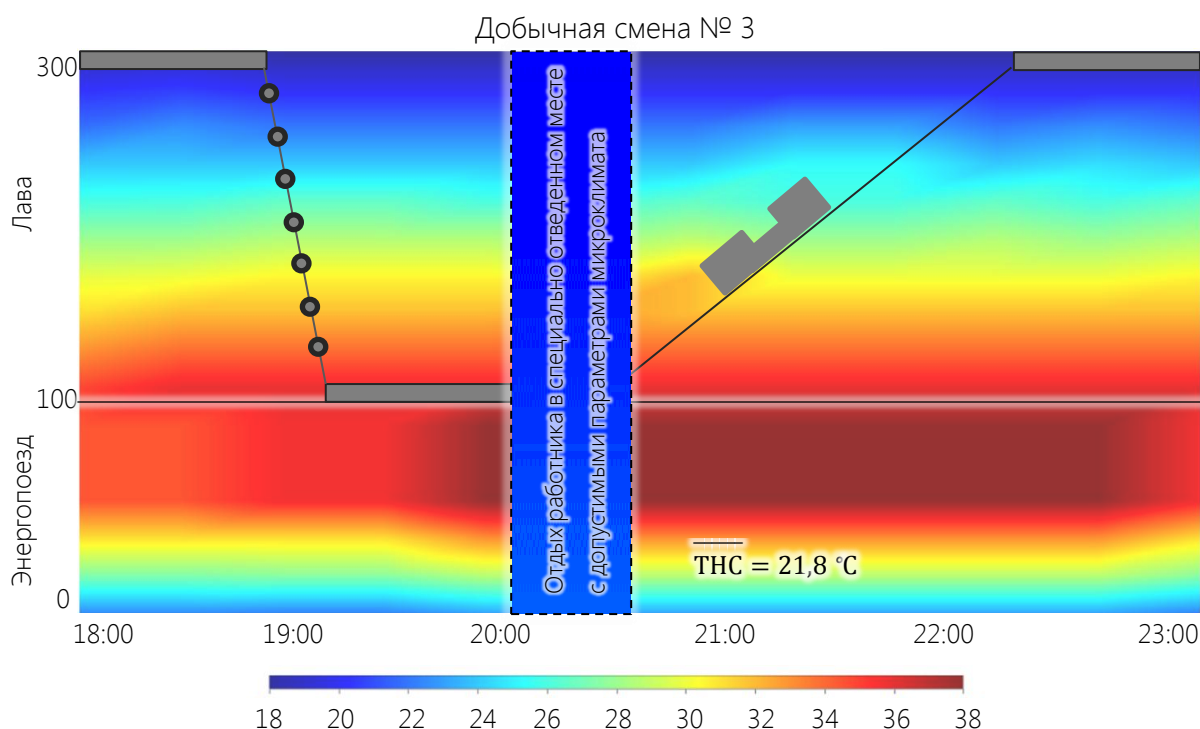


Рисунок 4.13 — Расчет тепловой нагрузки МГВМ лавы № 4-10в при регламентированном режиме работы

Таким образом, отдых работника в специально организованном месте с допустимыми параметрами микроклимата в течение 45 минут позволяет обеспечить требуемый уровень тепловой нагрузки.

#### 4.4.2 Ротация рабочих

Ротация рабочих мест заключается в замене рабочего звена (МГВМ и ГРОЗ), задействованного в рабочей зоне с вредными параметрами микроклимата на рабочее звено, задействованное в рабочей зоне с допустимыми параметрами микроклимата. Указанное мероприятие позволяет уравновесить тепловую нагрузку, испытываемую работниками «горячих» и «холодных» забоев.

Необходимым условием для реализации мероприятия является наличие близкорасположенных «горячего» и «холодного» забоев. Чем выше расстояние между забоями, тем существеннее снижение производительности лав.

При расчете среднесменной тепловой нагрузки помимо микроклиматических условий в «холодном» и «горячем» забоях необходимо учитывать воздействие параметров микроклимата при доставке работников от одного забоя к другому.

Выполним расчет требуемого времени работы для рассматриваемого забоя.

Пусть среднесменная тепловая нагрузка для работника «горячего» забоя соответствует значению 22,4 °С, а для работника «холодного забоя» 20,0 °С, параметры микроклимата в машине, осуществляющей доставку работников от «горячего» к «холодному» забою, соответствуют допустимым значениям ( $t_{\text{сух.}}=23$  °С,  $\phi_{\text{м.о.}}=30\%$ ), а время доставки составляет 30 минут.

Температура воздуха по влажному термометру в машине ( $t_{\text{вл.}}$ ) может быть рассчитана по формуле:

$$t_{\text{вл.}} = (0,00381\varphi + 0,636) \cdot t_{\text{сух.}} + 0,05461\varphi - 4 \cdot (0,01\varphi - 0,5)^2 - 4,94$$
$$t_{\text{вл.}} = (0,00381 \cdot 30 + 0,636) \cdot 23 + 0,05461 \cdot 30 - 4 \cdot (0,01 \cdot 30 - 0,5)^2 - 4,94 = 16,6 \text{ °С}$$

Значение ТНС в машине рассчитывается по формуле:

$$\text{ТНС} = 0,7 \cdot t_{\text{вл.}} + 0,3 \cdot t_{\text{сух.}}$$
$$\text{ТНС}_{\text{м.}} = 0,7 \cdot 16,6 + 0,3 \cdot 23,0 = 18,5 \text{ °С}$$

Для расчета среднесменной тепловой нагрузки необходимо решить уравнение:

$$\overline{\text{ТНС}} = \frac{\text{ТНС}_{\text{гор.з.}} \cdot \tau_{\text{гор.з.}} + \text{ТНС}_{\text{м.}} \cdot \tau_{\text{м.}} + \text{ТНС}_{\text{хол.з.}} \cdot \tau_{\text{хол.з.}}}{\tau_{\text{гор.з.}} + \tau_{\text{м.}} + \tau_{\text{хол.з.}}}$$

где  $\overline{\text{ТНС}}$  — среднесменная тепловая нагрузка в местах пребывания работника, °С;  
 $\text{ТНС}_{\text{гор.з.}}$  — тепловая нагрузка в рабочей зоне «горячего» забоя, принимается равной 22,4°С;  $\text{ТНС}_{\text{м.}}$  — тепловая нагрузка в машине, принимается равной 18,5°С;  $\text{ТНС}_{\text{хол.з.}}$  — тепловая нагрузка в рабочей зоне «холодного» забоя, принимается равной 20,0°С;  $\tau_{\text{гор.з.}}$  — продолжительность работы в «горячем» забое, принимается равной 165 мин;

$\tau_m$  — время доставки работника из «горячего» забоя в «холодный» забой, принимается равным 30 мин;  $\tau_{хол.з.}$  — продолжительность работы в «холодном» забое, принимается равной 165 мин.

По результатам расчета ротация рабочих мест позволила снизить тепловую нагрузку МГВМ «горячего» забоя с 22,4°С до 21,0°С.

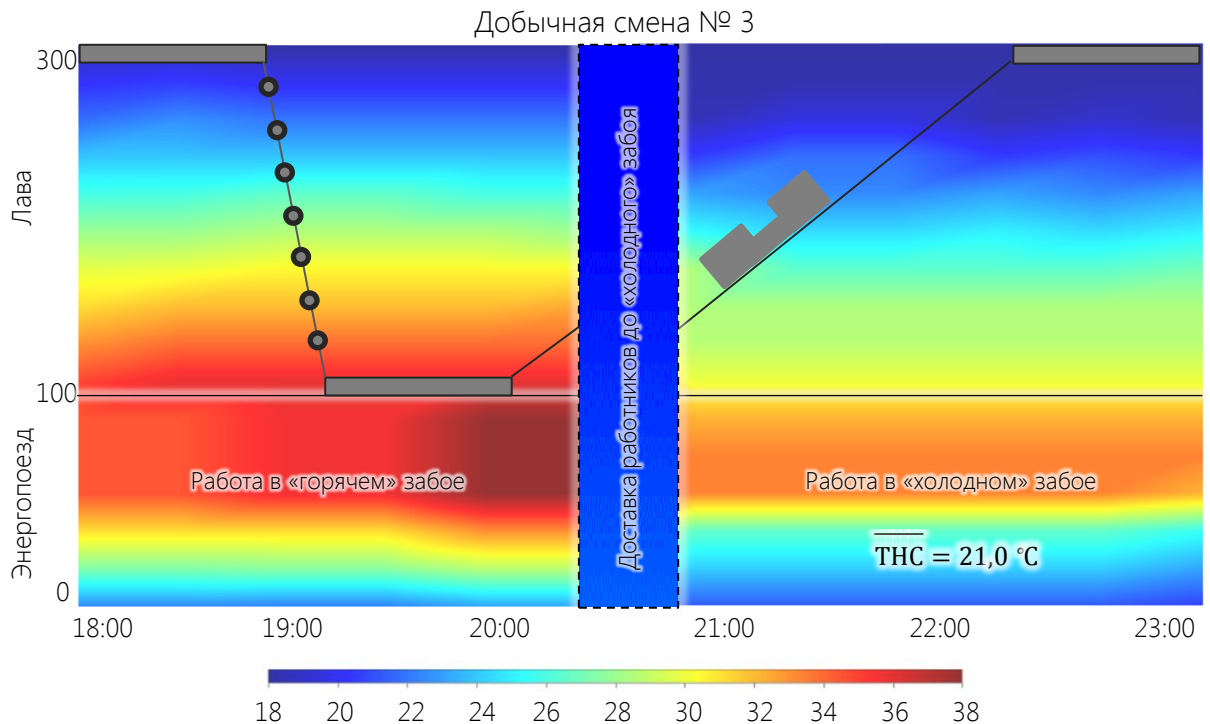


Рисунок 4.14 — Расчет тепловой нагрузки МГВМ лавы № 4-10в при регламентированном режиме работы

Таким образом, ротация рабочих может быть эффективным мероприятием по управлению тепловым режимом при наличии в непосредственной близости «горячих» и «холодных» забоев.

#### 4.4.3 Применение системы кондиционирования воздуха

Применение систем кондиционирования воздуха является способом нормализации микроклиматических условий в рабочих зонах рудников ОАО «Беларуськалий», который применяется в случае неэффективности прочих способов нормализации. При применении систем кондиционирования воздуха необходимо определить схему работы установки, холодопотребность забоя, теплоступления при транспортировке до забоя, после чего определить холодильную мощность системы кондиционирования воздуха и выполнить проверку обеспеченности расхода воздуха для



сброса тепловыделений от работы холодильного оборудования. Методика расчета требуемой холодильной мощности СКВ представлена в работе [26].

Применение системы кондиционирования осуществляется на основании расчета требуемой холодопроизводительности установки согласно параметрам микроклимата рабочей зоны.

Расчет требуемой мощности СКВ для рабочих зон осуществляется по формуле

$$W = Q \cdot \rho \cdot (I_k - I_n), \text{ кВт} \quad (4.1)$$

где  $Q$  — расход воздуха, подаваемого для проветривания рабочей зоны, м<sup>3</sup>/с.

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$I_k$  — удельное теплосодержание воздуха на выходе из рабочей зоны, кДж/кг;

$I_n$  — удельное теплосодержание воздуха на входе в рабочую зону, кДж/кг.

Теплосодержание воздуха определяется с помощью Id-диаграммы влажного воздуха по измеренным значениям температуры и относительной влажности воздуха:

$$I = f(T, \varphi). \quad (4.2)$$

Температура ( $T$ ) и относительная влажность воздуха ( $\varphi$ ) определяются на основе экспериментальных измерений или прогнозируемых данных при разработанной в разделе 3 модели.

По результатам расчета холодильных мощностей рабочих зон рассчитывается требуемая холодопроизводительность системы кондиционирования по формуле:

$$W = K \cdot \sum_{i=1}^N W_i + W_{\text{ТП}}, \quad (4.3)$$

где  $K$  — коэффициент запаса, учитывающий тепlopоступления при движении воздуха от воздухоохладителя до рабочей зоны, принимается в зависимости от длины вентиляционного трубопровода по таблице 4.5;

$W_{\text{ТП}}$  — тепlopоступления системы холодоснабжения, принимаются в зависимости от удаленности холодильной машины от рабочей зоны по таблице 4.6.

Таблица 4.5 — Коэффициенты запаса, учитывающие тепlopоступления при движении воздуха по вентиляционному трубопроводу

Длина вент. трубопровода, м	50 м	500 м	750 м	900 м
K	1,1	1,25	1,35	1,6

Коэффициент  $K$  может быть определен по фактическим измерениям.

Таблица 4.6 — Теплоступления системы холодоснабжения

Удаленность, м	1000 м	2000 м	3000 м	4000 м	5000 м
$W_{тп}^*$ , кВт	20	35	50	65	80

\*Приведены данные для теплоизоляции толщиной 30 мм и коэффициентом теплопроводности 0,042 Вт/м/°С. Теплоступления могут быть определены теплотехническим расчетом теплоизоляции системы холодоснабжения.

Мощность тепловыделения системы кондиционирования воздуха определяется для выбора способа утилизации избыточной теплоты от работы холодильного оборудования по формуле

$$N_{тв} = W + N_{компр} + N_{вент} + N_{нас} \quad (4.4)$$

где  $N_{компр}$  — мощность компрессора холодильной машины, кВт — определяется технической документацией на систему кондиционирования воздуха, в отсутствии данных принимается как 80 % от холодопроизводительности холодильной машины;

$N_{вент}$  — мощность вентиляторной установки градирни, кВт — определяется технической документацией на систему кондиционирования воздуха, в отсутствии данных принимается 90 кВт;

$N_{нас}$  — суммарная мощность насосного оборудования системы кондиционирования воздуха, кВт — определяется технической документацией на систему кондиционирования воздуха, в отсутствии данных принимается 95 кВт.

Избыточная теплота от работы системы кондиционирования воздуха утилизируется вентиляционной струей участка, на котором установлены градирни системы кондиционирования воздуха. Проверка требуемого расхода воздуха для сброса тепловыделений выполняется по формуле

$$Q_{тр} = \frac{N_{тв}}{\rho \cdot c \cdot \Delta T_{max}} \quad (4.5)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

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

$\Delta T_{max} = 10$  °С — максимально допустимое приращение температуры воздуха на участке.

В том случае, когда расход воздуха на участке недостаточен для утилизации тепловыделений от работы системы кондиционирования воздуха, применяется система орошения. Требуемая производительность системы орошения  $G_v$  определяется по формуле

$$G_v = \frac{N_{тв} - Q_{ф} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T_{max}}{L} \quad (4.6)$$

где  $L$  — теплота фазового перехода воды, кДж/кг.

Организация кондиционирования воздуха длинных очистных забоев рудников ОАО «Беларуськалий» может осуществляться по двум технологическим схемам.

Первым вариантом технологической схемы является размещение всех элементов СКВ в технологической сбойке, ближайшей к забою (см. рисунок 4.15).

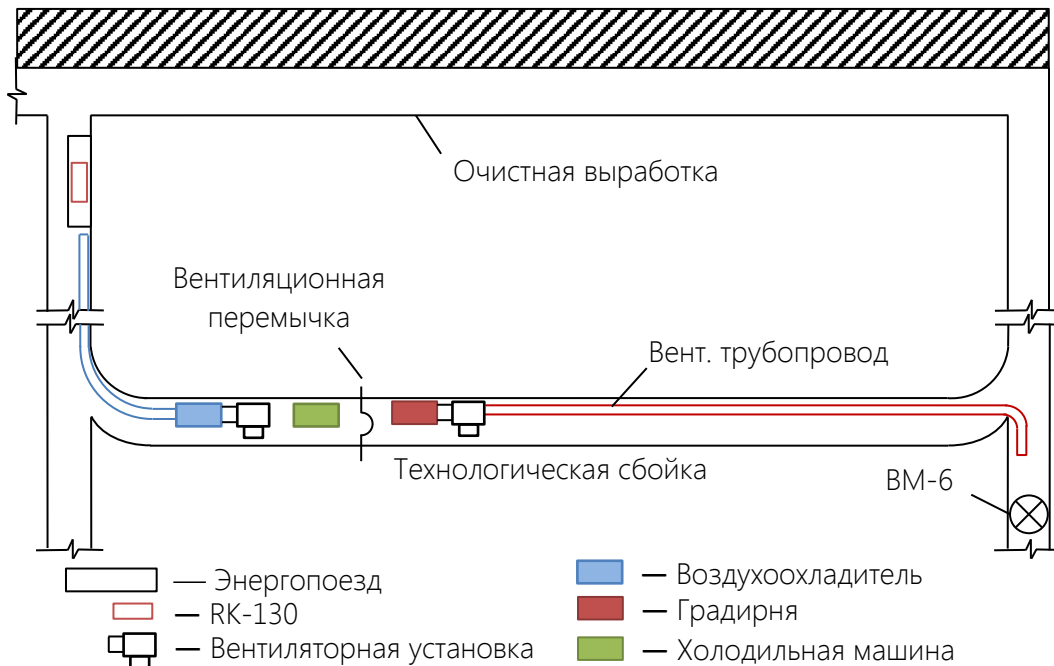


Рисунок 4.15 — Схема размещения элементов СКВ в технологической сбойке

Подача охлажденного воздуха в рабочую зону по данной схеме осуществляется за счет вентиляторной установки воздухоохладителя, работающей на гибкий вентиляционный трубопровод, проложенный по вспомогательному транспортному штреку панели до энергопоезда. Сброс теплоизбытков от работы холодильной машины осуществляется посредством градирни и вентиляторной установки, работающей на гибкий вентиляционный трубопровод, проложенный по технологической сбойке до вентиляционного штрека панели.

Вторым вариантом технологической схемы является размещение элементов СКВ в начале панели в районе сопряжения горных выработок панели с выработками главного направления (см. рисунок 4.16).

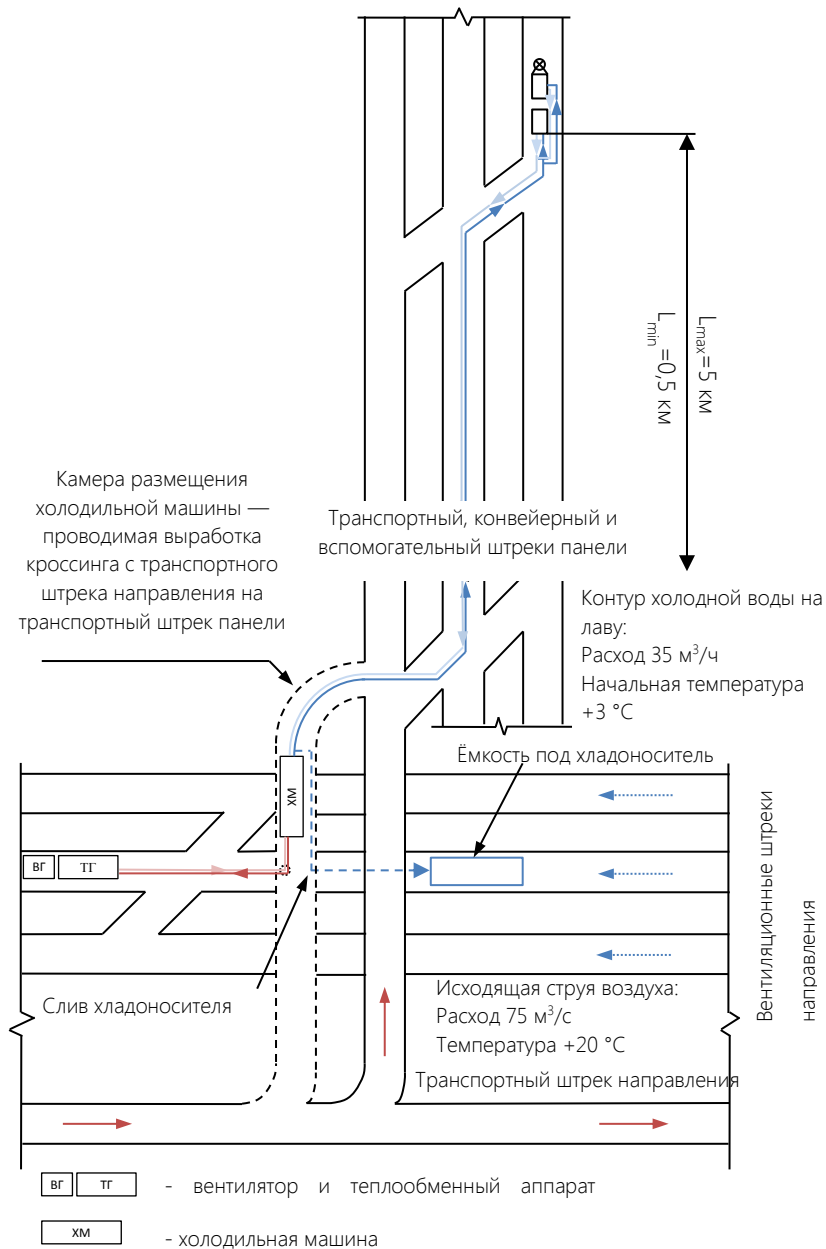


Рисунок 4.16 — Схема размещения элементов СКВ в районе сопряжения с главным направлением

Для размещения холодильной машины требуется проведение дополнительной выработки — кроссинга с транспортных выработок главного направления на транспортный штрек панели. Градирня с вентилятором размещаются в вентиляционных выработках главного направления. Холодоснабжение лавы осуществляется посредством трубопроводов, проложенных по конвейерному штреку панели. В процессе подвигания забоя потребуется укорачивание магистрального трубопровода транспортировки хладоносителя. Укорачивание магистрального трубопровода выполняется совместно с укорачиванием конвейерных линий панели. Излишки хладоносителя, возникающие в

результате укорачивания трубопроводной сети, утилизируются в ёмкость, расположенную в выработках главного направления.

Для условий лавы №4-10в представленных в таблице 4.7 выполнен расчет холодильной мощности СКВ.

Таблица 4.7 — Исходные данные для расчета СКВ лавы №4-10в

Расход воздуха для проветривания рабочей зоны	12 м <sup>3</sup> /с
Плотность воздуха	1,2 кг/м <sup>3</sup>
Относительная влажность воздуха	40 %
Удельное теплосодержание воздуха на выходе из РЗ	47,5 кДж/кг
Удельное теплосодержание воздуха на входе в РЗ	74,6 кДж/кг
Коэффициент запаса, учитывающий теплопоступления при движении воздуха по вентиляционному трубопроводу	1,25
Теплопоступления системы холодоснабжения	35 кВт

По результатам расчет требуемая холодильная мощность СКВ должна составлять не менее 250 кВт. Применение СКВ позволит охладить воздух рабочей зоны до температуры 26 °С на наиболее неблагоприятном участке рабочей зоны (участок энергопоезда). Результаты расчета параметров микроклимата в лаве №4-10в при внедрении СКВ представлены на рисунке 4.17.

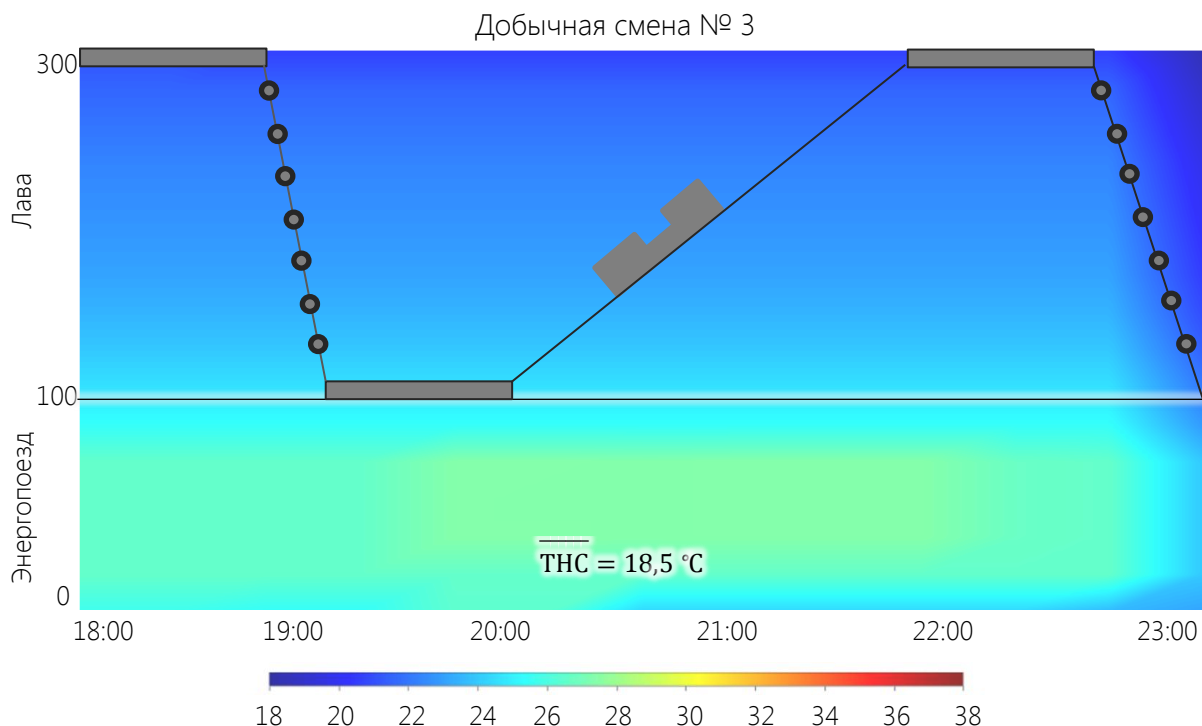


Рисунок 4.17 — Расчет тепловой нагрузки МГВМ лавы № 4-10в при внедрении СКВ

#### 4.5 Разработка прибора для контроля микроклиматических и физиологических параметров

В разделе предложены технические требования к разработке мобильного прибора, осуществляющего контроль физиологических параметров работника, а также контроль изменения микроклиматических параметров в местах нахождения работника в течение смены.

Разрабатываемое средство контроля представляет собой два независимых модуля осуществляющих измерения:

- временной динамики параметров рудничной атмосферы (температура, влажность);
- показателей организма (температура тела, частота сердечных сокращений).

Первый модуль должен иметь датчик измерения параметров микроклимата, а также, блок управления осуществляющий сбор данных, расчет текущих/среднесменных параметров, а также их индикацию на экране. Предполагается, что данный модуль будет размещаться на спецодежде работника. Датчик измерения ЧСС будет размещаться в области груди работника. Передача данных между модулями должна осуществляться посредством Bluetooth. В случае превышения пороговых значений температуры и

влажности воздуха в рабочей зоне необходимо предусмотреть возможность звуковой индикации.

Разрабатываемый прибор должен иметь взрывозащищенное/особо взрывозащищенное исполнение. Измерение показателей должно производиться в широких пределах с достаточной точностью.

Необходимо предусмотреть возможность беспроводной связи по Bluetooth для съема данных и Wi-Fi для связи с модулями в горных выработках (при наличии), а также разработать программное обеспечение позволяющее снимать, хранить и обрабатывать полученные данные.

Подробнее с техническими требованиями разрабатываемого прибора можно ознакомиться в таблице 4.8

Таблица 4.8 — Технические требования к прибору

№ п/п	Параметр	Требования
1	Объект	Мобильный прибор
2	Функциональное назначение	Выполнение нестационарных измерений временной динамики параметров рудничной атмосферы (температура, влажность), а также показателей организма (температура тела, частота сердечных сокращений).
3	Внешние условия применения	Температура воздуха от -50 °С до +60 °С Температура тела до +43 °С Аэрозольный состав атмосферы: — наличие капельной влаги; — наличие сернистой и соляной пыли с концентрациями до 1 500 мг/м <sup>3</sup> . Скорость движения воздуха – до 40 м/с. Абсолютное давление – до 130 000 Па.
4	Требования к взрывозащите и защите от воздействия пыли и влаги	Исполнение – взрывозащищенное или особо взрывозащищенное. Степень оболочки – не ниже IP 54.
5	Требования к измерениям	Температура воздуха – диапазон -50...+60 °С, с точностью не ниже 0,5 °С. Влажность воздуха – диапазон 1...100 %, с точностью не ниже 1 %. Температура тела – диапазон 32...43 °С, с точностью не ниже 0,1°С. Частота сердечных сокращений – диапазон 30-250 уд/мин, с точностью не менее 1 уд/мин. Измерение температуры тела и ЧСС предусмотреть выносным датчиком, закрепляемым на груди работника.

№ п/п	Параметр	Требования
6	Связь	Возможность беспроводной связи по Bluetooth для съема данных и Wi-Fi для связи с модулями в горных выработках (при наличии).
7	Обслуживание	Разработка стационарной или полустационарной станции для зарядки и съема накопленной информации. Разработка приложений для настройки станции, хранения, обработки и съема полученных данных.
8	Требование по времени работы и частоте записи данных	Непрерывная работа на протяжении не менее 24 часов. Предусмотреть настройку периодичности измерений разных параметров, представленных в пункте 5. Минимальный период измерений и записи – 1 секунда.
9	Требования к размещению	Предусмотреть расположение прибора на спецодежде работников. Для измерения температуры тела человека и ЧСС предусмотреть отдельный датчик, фиксируемый на груди работников.
10	Дополнительные требования	Вес станции – не более 0,25 кг. Предусмотреть возможность подключения нагрудного датчика к прибору посредством Bluetooth с выводом измеряемых показателей на прибор. Предусмотреть первичную статическую обработку получаемых данных с выводом текущих показателей (температура воздуха, влажность, температура тела, ЧСС, ТНС-индекс). Предусмотреть расчет среднесменных показателей на основе измеряемых данных трендов (ТНС-индекс, уровень энергозатрат, класс условий труда). Предусмотреть возможность звуковой индикации в случае превышения пороговых значений температуры и влажности воздуха в рабочей зоне.

Применение указанного прибора в совокупности с мероприятиями, направленными на нормализацию микроклимата в выработках рудников, позволит организовать мониторинг параметров микроклимата, своевременно выявлять и предотвращать возникновение опасных условий труда.

#### 4.6 Выводы по главе

Использование представленного в главе алгоритма комплексирования организационных и технических мероприятий позволяет эффективно управлять тепловым режимом рудника, исключая возможность снижения концентрации работников вследствие воздействия нагревающего микроклимата, сохранение здоровья работников и обеспечивая безаварийную работу используемого оборудования при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.



Параметры, учитываемые при расчете ТНС-индекса, определяют возможность внешней среды отводить тепловыделения от человеческого тела, что с точки зрения медицины является наиболее точным подходом в оценке.

Расчет среднесменного значения ТНС позволяет повысить точность определения испытываемой работником тепловой нагрузки поскольку учитывает как перемещение работника в течение смены, так и изменение параметров микроклимата в подготовительных и очистных забоях связанные с нестационарным характером тепловыделений от оборудования. Совокупное использование разработанной динамической модели тепломассообменных процессов и данных о местонахождении работников в течение рабочей смены позволяет с достаточной точностью определить испытываемую работниками тепловую нагрузку без применения систем контроля параметров микроклимата. Важным преимуществом использования такого подхода является возможность моделирования мероприятий, направленных на снижение влияния нагревающего микроклимата на реальных вентиляционных сетях. Кроме того, указанный подход может применяться для прогноза тепловой нагрузки на перспективных участках рудника.

Результаты выполненных исследований указывают на то, что в ряде случаев применение указанного подхода к нормированию позволяет не только повысить точность определения тепловой нагрузки, но и обосновывать более высокие температуры в выработках без снижения уровня безопасности ведения горных работ. Необходимым условием для такой ситуации является обоснование безопасности указанной системы в условиях исследуемых рудников. Разработанный подход к нормированию может быть особенно полезен для предприятий осуществляющих подземную разработку месторождений на больших глубинах.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе содержится решение научно-практической задачи управления тепловым режимом рабочих зон длинных очистных забоев для обеспечения безопасного ведения горных работ в условиях нагревающего микроклимата.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Проведены экспериментальные исследования динамики тепловыделений от оборудования подготовительных и очистных выработок калийных рудников.
2. Разработаны математические модели, описывающие нестационарный характер нагрева и охлаждения оборудования в горных выработках.
3. Проведены экспериментальные исследования динамики распределения микроклиматических параметров воздуха в длинных очистных забоях калийных рудников и в сопряженных с ними выработках.
4. Исследованы особенности формирования микроклиматических условий в добычные и ремонтные смены.
5. Разработана динамическая модель распределения микроклиматических параметров в длинных очистных забоях с учетом нестационарной работы источников тепловыделения.
6. Разработан методический подход к комплексированию организационных и технических мероприятий по управлению тепловым режимом подземных рабочих зон.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андрейко С.С., Калугин П.А., Щерба В.Я. Газодинамические явления в калийных рудниках: генезис, прогноз и управление. — Минск: Высш. шк., 2000. — 335 с.
2. Аренс В.Ж., Дмитриев А.П., Дядькин Ю.Д. и др. Теплофизические аспекты освоения ресурсов недр. — Л.: Недра, 1988. — 336 с.
3. Афанасьева Р.Ф., Чеботарев А.Г., Константинов Е.И. Методические подходы к установлению класса условий труда по параметрам микроклимата на рабочих местах горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. — 2013. — № 6 (112). — С. 72–76.
4. Баратов Э.И., Черняк В.П. Тепловые расчеты и способы охлаждения воздуха при строительстве глубоких шахт. — М.: Недра, 1968. — 123 с.
5. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности: в 2 ч. — М.: Высшая школа, 1982. — Ч. 1. — 327 с.
6. Богинский П.Я., Гендлер С.Г., Хуцишвили В.И. Исследование процессов нестационарного теплообмена при нагнетательном проветривании тупиковых выработок // В сб. Физические процессы горного производства. — 1977. — №4. — С. 80–86.
7. Бородавкин Д.А. К вопросу нормирования микроклиматических условий на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий» // Горное эхо. — 2021. — № 4. — С. 96–101.
8. Бородавкин Д.А., Зайцев А.В., Паршаков О.С., Хохряков Д.С. Экспериментальное исследование условий труда подземных рабочих в нагреваемом микроклимате глубокого полиметаллического рудника // Безопасность труда в промышленности. — 2023. — № 2. — С. 69–75.
9. 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.
10. Бойко О.А., Бойко В.А. Исследование влияния теплоуравнивающей оболочки пород горного массива на величину притока теплоты в горную выработку глубокой шахты Донбасса // Науковий вісник НГУ. — Днепропетровск, 2011. — №3 — С. 98–106.
11. 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.

12. Бронников Д.М., Замесов Н.Ф., Богданов Г.И. Разработка руд на больших глубинах. — М.: Недра, 1982. — 292 с.
13. 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.
14. Васенин И.М. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / Васенин И.М., Шрагер Э.Р. Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Костеренко В.Н. // Компьютерные исследования и моделирование. — Ижевск: Изд-во Ижевского института компьютерных исследований. — 2011. — Том 3, № 2. — С. 155–163.
15. Величко А.Е. Зависимости для теплового расчета тупиковых выработок при охлаждении подаваемого в забой воздуха. В сб.: Охлаждение воздуха в угольных шахтах. —Макеевка-Донбасс, 1975, вып.4. — С. 8–12.
16. Величко А.Е. Приближенный метод расчета температуры в горных выработках угольных шахт Донбасса. В сб.: Охлаждение воздуха в угольных шахтах. — Макеевка-Донбасс, 1971. — вып.2. — С. 72-78.
17. Величко А.Е. Тепловой режим тупиковых выработок // В сб. разработка месторождений полезных ископаемых. —1978. — №49. — С. 40–41.
18. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Том I. Анализ парадигмы. — Донецк: Норд-Пресс, 2008. — 632 с.
19. Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. — М.: Недра, 1967. — 247 с.
20. Воропаев А.Ф. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха в глубоких шахтах. — М.: Недра, 1979. — 192 с.
21. Дуганов Г.В., Баратов Э.И. Тепловой режим рудников. — М.: Госгортехиздат, 1963. — 144 с.
22. Дуганов Г.В., Баратов Э.И. Тепловой режим рудников. — М.: Госгортехиздат, 1963. — 144 с.
23. Дударь Е.С. Исследование процессов тепломассопереноса в калийных рудниках и конденсации влаги в шахтной вентиляционной сети: автореф. ... дисс. канд. техн. наук. — Тула, 2011. — 22 с.
24. 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.
25. Дядькин Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. — М.: Недра, 1968. — 256 с.
  26. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дисс. ... д-ра. техн. наук. — Пермь, 2019. — 247 с.
  27. Зайцев А.В., Бородавкин Д.А., Поляков И.В. Обеспечение безопасных условий труда по фактору микроклимата для условий глубокого калийного рудника // Горное эхо. — 2020. — № 1. — С. 72–79.
  28. Зайцев А.В., Бородавкин Д.А., Поляков И.В., Власова Е.М. Нормирование температурного режима в условиях нагревающего микроклимата горных выработок // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2021. — № 4. — С. 145–158.
  29. Зайцев А.В., Левин Л.Ю., Казаков Б.П., Клюкин Ю.А. Теплотехнические системы нормализации микроклиматических параметров воздуха в глубоких рудниках ЗФ ПАО "ГМК "Норильский никель" // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 34–40.
  30. Зайцев А.В., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Исследование критериев нормирования микроклиматических условий в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № 12. — С. 151–156.
  31. 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.
  32. Зильбельборд А.Ф. Тепловой режим шахт в области распространения многолетнемерзлых горных пород. — М.: АН СССР, 1963. — 95 с.
  33. Зимин Л.Б. Использование естественных и техногенных энергоресурсов в системах нормализации микроклимата подземных сооружений: автореф. ... дисс. д-ра техн. наук. — Казань, 1995. — 40 с.
  34. Иванников А.Л. Математическое моделирование шахтных вентиляционных сетей, содержащих выработки с неустойчивым проветриванием: автореф. ... дисс. канд. техн. наук. — Москва, 2009. — 26 с.
  35. Измеров Н.Ф. Российская энциклопедия по медицине труда. — М.: ОАО «Медицина», 2005. — 656 с.

36. Инструкция по оценке условий труда при аттестации рабочих мест по условиям труда // Утверждена Постановлением министерства труда и соцзащиты РБ от 22.02.2008 №35 — 2020.
37. Казаков Б.П. и др. Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ / Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Шалимов А.В., Зайцев А.В. // Записки Горного института. — 2017. — Т. 223. — С. 116–124.
38. Казаков Б.П. Формирование и нормализация микроклимата подземных рудников при разработке месторождений калийных солей: дисс. д-ра техн. наук. — Пермь, 2001. — 311 с.
39. Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Современные подходы к разработке способов управления тепловым режимом рудников при высокой температуре породного массива // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 22–25.
40. Казаков Б.П., Шалимов А.В. О температуре крепи вентиляционных стволов при реверсировании главных вентиляторных установок // Безопасность труда в промышленности. — 2006. — № 10. — С. 12–14.
41. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Зайцев А.В. Нестационарный сопряженный теплообмен между рудничным воздухом и горным массивом в условиях глубоких рудников // Известия вузов. Горный журнал. — 2013. — № 1. — С. 26–32.
42. Карслоу Х.С. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — 488 с.
43. Кертиков В. Методика за изчисляване температурата на въздуха при комбинирата схема на местне проветряване, кочато нагнетателният вентилятор с монтиран в началто на изработката // Рудодобив. 1973. — т.28, № 9. — С.7–10.
44. Клебанов Р.Д., Коноплянко В.А., Яковлев С.Е. Новые подходы к оценке нагревающего микроклимата на основе индекса тепловой нагрузки среды // Здоровье и окружающая среда. — 2015. — № 25. — С. 19–22.
45. Клебанов Ф.С., Костин В.А. Расчет теплового режима в подготовительной выработке, проводимой механизированным комплексом // Научн. сообщ. ИГД им. Скочинского А.А. — 1975. — т.26. — С. 199–204.
46. Коздоба Л.А. Вычислительная теплофизика. — Киев: Наукова думка, 1992. — 224 с.
47. Костеренко В.Н. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции горных выработок угольных шахт: автореф. ... дисс. канд. техн. наук. — Томск, 2011. — 21 с.
48. 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: МакНИИ, 1975. — С. 46–51.
49. Красноштейн А.Е., Казаков Б.П., Шалимов А.В. Моделирование процессов нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2007. — № 5. — С. 77–85.
50. Кремнёв О.А. Нестационарная теплопроводность полых тел, ограниченных круговой цилиндрической поверхностью, при заданном законе ее теплообмена с охлаждающей или нагревающей средой // Доклады АН СССР. — 1952. — т. 85. — С. 1009–1012.
51. Кремнев О.А. Особенности и методы теплового расчета шахтных выработок, вентилируемых до года // Труды семинара по горной теплофизике. — 1959. — вып. 2. — С. 20–26.
52. Кремнёв О.А. Теплообмен между вентиляционной струёй и горными массивами старых шахт и выработок // Труды ИТЭ АН УССР. — №10. — 1954. — С. 12–17.
53. Лапшин А.А. Математическое моделирование теплообменных процессов при движении воздуха в горных выработках шахт // Научный вестник Московского государственного горного университета. — 2013. — № 12. — С. 93–101.
54. Левин Л.Ю. Исследование и разработка ресурсосберегающих систем воздухоподготовки для рудников: дисс. ... канд. техн. наук. — Пермь, 2004. — 143 с.
55. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Контроль теплового режима породного массива на основе применения оптоволоконных технологий мониторинга температур в скважинах // Горное эхо. — 2016. — № 1. — С. 35–37.
56. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 2. — С. 154–161.
57. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.
58. Малашенко Э.М., Зимин Л.Б. Методы тепловых расчетов тупиковых горных выработок. В кн.: Тепловой режим глубоких угольных шахт и металлических рудников. — К., 1977. — С. 101–116.
59. Методика проведения специальной оценки условий труда // Утверждена Приказом Министерства труда и социальной защиты РФ № 33н от 24.01.2014. — 2020.

60. Ониани Ш.И. Тепловой режим рудничной атмосферы при наличии в горном массиве термальных вод // В кн. Тепловой режим глубоких угольных шахт и металлических рудников. — 1977. — С. 49–60.
61. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках // Горная промышленность. — М.: Научно-производственная компания «Гемос Лимитед». — 2007. — № 6. — С. 20–23.
62. Пересторонин М.О., Зайцев А.В., Семин М.А., Бородавкин Д.А. Экспериментальное исследование переходных тепловых режимов длинных очистных забоев // Горные науки и технологии. — 2022. — № 1. — С. 37–48.
63. Пивняк Г.Г., Бойко В.А. Пути решения проблемы нормализации тепловых условий в горных выработках глубоких шахт Донбасса // Горный журнал. — Санкт-Петербург, 2012. — №8 — С. 15–18.
64. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности // Приказ Ростехнадзора № 534 от 15.12.2020. — 2020 г.
65. Правила безопасности в угольных шахтах // Приказ Ростехнадзора № 507 от 8.12.2020. — 2022 г.
66. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых // Приказ Ростехнадзора № 505 от 8.12.2020. — 2020 г.
67. Правила по обеспечению промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений РБ, утв. Постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям РБ от 30.08.2012 №45 — 2017.
68. Проектная документация «Горно-обоганительный комбинат по добыче и обогащению калийных солей мощностью 2,3 млн т/год 95 % KCl Гремячинского месторождения Котельниковского района Волгоградской области. Рудник Гремячинского ГОК». Санкт-Петербург: ООО «ТОМС-проект», 2017.
69. 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. — 2015.
70. Санитарные нормы и правила «Гигиеническая классификация условий труда» // Утверждены Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 № 211. — 2012.
71. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Гигиенические требования к микроклимату при проектировании и эксплуатации калийных



- рудников» // Утверждены Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 13.01.2009 № 5. — 2009.
72. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» // Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 21.06.2016 № 81— 2017.
73. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «ТНС»: № 2023686665 / Богомятков А.В., Бородавкин Д.А., Зайцев А.В., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Семин М.А.; заявитель и правообладатель ПФИЦ УрО РАН. — № 2023686665; заявл. 30.11.23; дата регистрации 12.12.23. — 1 с.
74. Свод правил. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\* утв. Приказом Минрегион России от 30.06.2012 № 275, 2013 — 154 с.
75. Скуба В.Н. Совершенствование разработки угольных месторождений области многолетней мерзлоты. — Якутск: Якутское книжн. изд-во, 1974. — 320 с.
76. Смирнов Ю.М. Управление тепловым режимом тупиковых выработок глубоких рудников Норильска: дисс. ... канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, 1998. — 189 с.
77. СНБ 2.04.02-2020. Строительная климатология. — Минск, 2001. — 37 с.
78. Соболев С.Л. Уравнения математической физики. — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. — 424 с.
79. Старков Л.И., Земсков А.Н., Кондрашев П.И. Развитие механизированной разработки калийных руд. — Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. унт-а, 2007. — 522 с.
80. Степанов И.С. Обоснование метода оценки профессионального риска для условий нагревающего микроклимата при проведении горных работ на нефтяных шахтах: дисс. канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, 2018. — 131 с.
81. Стукало В.А. О коэффициенте нестационарного теплообмена выработок, проветриваемых менее года // Разработка месторождений полезных ископаемых. Республ. межвед. науч.-техн. сб. — 1976. — №43. — С. 62–64.
82. Тимофеева Е.И., Федорович Г.В. Экологический мониторинг параметров микроклимата. — М.: НТМ-Защита, 2005. — 194 с.
83. Хохлов Ю.А. Математическое моделирование процессов тепломассообмена вентиляционного воздуха с горными породами в протяженных выработках шихт и рудников криолитозоны // Наука и образование. — 2015. — № 3 (79). — С. 50–54.
84. Хохотва Н.Н., Яковенко А.К. Кондиционирование воздуха при строительстве глубоких шахт. — М.: Недра, 1985. — 184 с.

85. Цейтлин Ю.А. Проектирование и эксплуатация шахтных систем кондиционирования воздуха. — М.: Недра, 1983. — 261 с.
86. Цейтлин Ю.А. Установки для кондиционирования воздуха в шахтах. — М.: Недра, 1974. — 168 с.
87. Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 416 с.
88. Чеботарёв А.Г., Афанасьева Р.Ф. Физиолого-гигиеническая оценка микроклимата на рабочих местах в шахтах и карьерах и меры профилактики его неблагоприятного воздействия // Горная промышленность. — 2012. — № 6. — С. 34–40.
89. 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.
90. Черняк В.П., Золотаренко Ю.П., Брайчева Н.А. Тепловые расчеты неплотных систем рудничной вентиляции. В кн.: Тепловой режим глубоких угольных шахт и металлических рудников. — К., 1977. — С. 88–101.
91. Чичиндаев А.В., Дьяченко Ю.В., Хромова И.В. Влияние внутренних источников тепла на процессы теплообмена в системе "человек-тепловая защита-окружающая среда" // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. — 2016. — № 1 (30). — С. 108–115.
92. Шточес Б., Черник Б. Вентиляция глубоких шахт. — ОНТИ Украины, 1934. — 217 с.
93. Шувалов Ю.В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера: Ресурсосберегающие системы. — Л.: Издательство Ленинградского университета, 1988. — 196 с.
94. 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.
95. Щербань А.Н., Брайчева Н.А., Черняк В.П. и др. Аналитическое исследование теплового режима и определение основных параметров системы искусственного микроклимата горного комплекса «штольня-камера» // Теплофизика и теплотехника. — 1977. — №32. — С. 7–11.
96. 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.

97. 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. 2 — 320 с.
98. 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.
99. Щербань А.Н., Малашенко Э.М., Зимин Л.Б. Методика расчета температуры вентиляционной струи в тупиковых горных выработках. — Киев.: Мпп при КиНХ, 1975. — 66 с.
- 100.Щербань А.Н., Черняк В.П. Методы прогноза теплового режима глубоких шахт // ФТПРПИ. — 1977. — № 2. — С. 88–92.
- 101.Щербань А.Н., Черняк В.П., Брайчева Н.А. Методы расчета температуры воздуха в строящихся горных выработках и воздуховодах для их проветривания // ФТПРПИ. — 1977. — № 5. — С. 69–76.
- 102.Щербань А.Н., Черняк В.П., Брайчева Н.А. Решение системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами для расчета температуры рудничного воздуха // АН УССР. — 1975. — № 9. — С. 843–847.
- 103.Ягельский А.Н. Тепловые расчеты вентиляционного воздуха выработок с тупиковым забоем в глубоких угольных шахтах. — М.: Недра, 1960. — 143 с.
- 104.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.
- 105.“The development report of world coal industry” Task Force. Ukraine’s coal industry // Coal Science and Technology. — 1999. — № 27(8). — С. 51–3.
106. Bluhm S.J., Von Glehn F.H., Marx W.M., Biffi M. VUMA mine ventilation software // Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa. — 2001. — № 54 (3). — С. 65–72.
- 107.De Broaf W.L. Echauffement de l'air de ventilation dans les puis et les voies d'entree d'air // Geologie en Minbouw. — 1961.— № 4. — С. 25–28.
- 108.Druyan A., Ketko I., Yanovich R., Epstein Y. Refining the distinction between heat tolerant and intolerant individuals during a heat tolerance test // J. Therm. Biol. — 2013. — № 38. — С. 539–542.
- 109.Gibson K.L. The computer simulation of climatic conditions in underground mines // 15th APCOM Symp. — 1977.— С. 349–354.

110. Gilmour G., Allsop A., Flack D., Hunneyball S. Prevention of heat illness in mines // Health and Safety Executive. — 2007. — №7. — С. 1–14.
111. Hartman H.L., Muthnansky J.M., Ramani R.V., Wang Y.J. Heat sources and effects in mine // Mine Ventilation and Air Conditioning. — 1997. — С. 585–617.
112. He M. Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard control // Mining Science and Technology (China). — 2009. — Т. 19. — №. 3. — С. 269–275.
113. He M. Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard control // Mining Science and Technology (China). — 2009. — Т. 19, №. 3. — С. 269–275.
114. HE Man-chao. Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard // Mining Science and Technology. — 2009. — № 19. — С. 269–275.
115. He MC, Xie HP, Peng SP, Jiang YD. Study on rock mechanics in deep mining engineering // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. — 2005. — №24(16). — С. 5–11.
116. Jacklitsch B.L., Williams W.J., Musolin K. Occupational exposure to heat and hot environments: revised criteria // DHHS. — 2016. — 192 с.
117. Jordan D.W. The Numerical Solution of Underground Heat Transfer Problems // Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. — 1965. — № 2. — С. 365–387.
118. Kielblock A.J., Schutte P.C. Human Heat Stress: Basic Principles, Consequences and its Management // Minesafe International Conference Proceedings, International Conference on Occupational Health and Safety in the Minerals Industry, Perth. — С. 279–294.
119. Lapshin A.A. Mathematical simulation of microclimate normalisation processes in deep ore mines // Науковий Вісник Національного Гірничого університету. — 2014. — № 3. — С. 137–144.
120. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations // Journal of mining science. — 2014. — № 2. — С. 371–378.
121. Lowndes I.S., Crossley A.J., Yang Z.Y. The ventilation and climate modelling of rapid development tunnel drivages // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2004. — № 19 (2). — С. 139–150.
122. Manchao H., Xiuling C., Qiao X. Principles and technology for stepwise utilization of resources for mitigating deep mine heat hazards // Mining Science and Technology (China). — 2010. — Т. 20. — №. 1. — С. 20–27.
123. Mao J., Xu H. China's coal resource distribution and perspective prediction // Coal Geology & Exploration. — 1999. — № 27. — С. 1–4.
124. Maurya T., Karena K., Vardhan H. Potential sources of heat in underground mines – a review // Procedia Earth and Planetary Science. — 2015. — Т. 11. — С. 463–468.

125. McPherson M. J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways // *International Journal of Mining and Geological Engineering*. — 1986. — T. 4. — № 3. — C. 165–195.
126. McPherson M.J. Refrigeration in South African Gold Mines // *Mining Engineer (Feb.)*. — 1976. — C. 245–258.
127. McPherson M.J. *Subsurface ventilation and Environmental engineering*. — Chapman & Hall. — 2009. — 824 c.
128. McPherson M.J. The simulation of airflow and temperature in the stopes of S. African gold mines // *Proc. 1st Int. Mine Vent. Congress*. — Johannesburg, 1975. — C. 35–51.
129. Misaqi F.L., Inderberg J.G., Blumenstein, P.D. and Naiman, T. Heat Stress in Hot U.S. Mines and Criteria for Standards for Mining in Hot Environments // *Mining Enforcement and Safety Administration, United States Department of the Interior*. — MESA Report. — № 1048. — C. 1–47.
130. Parson K.C. Environmental ergonomics: a review of principles methods and models // *Journal of Applied Ergonomic*. — 2000. — № 31. — C. 581–594.
131. Roy T.R., Singh B. Computer simulation of transient climatic conditions in underground airways // *Mining Science and Technology*. — 1991. — № 13. — C. 395–402.
132. Sheer T.J., Butterworth D., Ramsden R. Ice as a coolant for deep mines Krakow // *Proceedings of the 7th international mine ventilation congress*. — 2001. — C. 354–60.
133. Wang J, Zhao YC, Liang D. The classification and development status of mine cooling air conditioning system // *Sun Yatsen University Forum*. — 2007. — № 27(2). — C. 109–13.
134. Wang Y.A. The development of gas drainage at the coal mine of Soviet Union // *Safety in Coal Mines*. — 1989. — № 10(3). C. 4–7.
135. Xin S. Wang W., Zhang N. Comparative studies on control of thermal environment in development headings using force/exhaust overlap ventilation systems // *Journal of Building Engineering*. — 2021. — T. 38. — C. 102–227.
136. Zaitsev A., Shalimov A., Borodavkin D. Unsteady coupled heat transfer in the air and surrounding rock mass for mine excavations with distributed heat sources // *Fluids*. — 2023. — № 2. — C. 67.