

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

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь 2024

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

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

**Официальные оппоненты:** **Гендлер Семен Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой безопасности производств  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-  
Петербургский горный университет императрицы  
Екатерины II» (г. Санкт-Петербург)

**Лискова Мария Юрьевна**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры безопасности жизнедеятельности  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет» (г. Пермь)

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСИС» (г. Москва)**

Защита диссертации состоится «21» июня 2024 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «ГИ УрО РАН» и на сайте <https://permsc.ru>.

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2024 года

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

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

Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02

E-mail: [lserg@mi-perm.ru](mailto:lserg@mi-perm.ru)

Ученый секретарь диссертационного совета  
канд. техн. наук

Лобанов С. Ю.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы диссертации**

Современные темпы развития горнодобывающей отрасли обуславливают необходимость вовлечения в отработку глубокозалегающих горизонтов, что приводит к невозможности подачи больших объемов воздуха и усилению влияния техногенных источников тепловыделения на формирование неблагоприятных микроклиматических условий в горных выработках. Высокие температуры воздуха могут оказать негативное влияние на работу оборудования и техники в рудниках, а также вызывать тепловой стресс у работников. Это состояние приводит к снижению способности концентрироваться и принимать решения. Что в свою очередь увеличивает число ошибок и несчастных случаев, особенно при выполнении сложных и опасных задач.

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. Андрющенко, Б.П. Казакова, А.В. Зайцева. Среди зарубежных коллег данным вопросом занимались M.J. McPherson, R. Brake, S.J. Bluhm, K.L. Gibson, L. Mackay, 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 горного массива с рудничным воздухом, а также работа тепловыделяющего оборудования.

На сегодняшний день исследования теплообменных процессов в подземных выработках осуществляются, как правило, с использованием математических моделей тепло-влаги- и воздухораспределения в рудничной вентиляционной сети. Существующие модели способны рассматривать техногенные источники тепловыделений (горные машины и оборудование) только в режимах «работы» и «останова». 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).

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**

1. 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.
2. 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.
3. Комплексирование 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 натурных 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.

### **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.

### **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).

### **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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **I научное положение:**

*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.*

Учет искусственных источников тепловыделения важен, если они находятся по тракту движения воздуха до рабочих зон, так как в этом случае они могут влиять на температуру воздуха, поступающего на проветривание рабочих зон. Наличие локальных источников тепловыделения при этом, как правило, не оказывает влияния, так как 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.

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных измерений в конвейерных штреках рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий», разница конечной температуры воздуха и температуры горных пород обусловлена тепловыделениями от конвейеров.

Таблица 1 — Измерения температуры воздуха в конце штрека

Название комплекса	Высотная отметка, м	Расход воздуха, подаваемого на проветривание, м <sup>3</sup> /с	Температура массива горных пород, °С	Температура воздуха перед энергопоездом, °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.

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.

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 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, поэтому сопряжённая постановка задачи теплообмена



может быть сведена к постановке граничного условия 4-го рода без моделирования теплопередачи через пограничный слой.

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). Значение объёмной теплоёмкости  $c_m$  (Дж/(м<sup>3</sup>·°C)) 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>·°C)) и постоянной температурой  $T_{a0}$  (°C). Считается, что в начальный момент времени до включения источника тепла весь массив со всем воздухом в выработке при  $x > 0$  имеют температуру «непотревоженного» массива  $T_{m\infty}$  (°C). 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.

Уравнение теплопроводности в массиве в цилиндрических координатах имеет вид:

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

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):

$$\frac{\partial Q_a}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial Q_a}{\partial x} = j_m \cdot \Delta F + w \cdot \Delta V, \quad (2)$$

где  $w$  – удельное тепловыделение в объёме выработки задающее интенсивность выделения тепла от равномерно распределённого по длине выработки источника (конвейерной ленты), Дж/(м<sup>3</sup>·с).

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

$$a \cdot \frac{\partial T_a}{\partial x} + \frac{\partial T_a}{\partial t} = b \cdot \left[ \frac{\partial T_m}{\partial x} \right]_{r=1} + \bar{w}, \quad (3)$$

$$a = \frac{v \cdot r_0}{\chi_m},$$

$$b = \frac{2 \cdot c_m}{c_a},$$

$$\bar{w} = \frac{w \cdot r_0^2}{\chi_m \cdot c_a}.$$

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

$$a \frac{b}{c} \cdot ([T_m]_{r=1} - T_a) = \left[ \frac{\partial T_m}{\partial x} \right]_{r=1}, \quad (4)$$

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

Поскольку условие (3) содержит производную по координате, оно должно быть дополнено значением температуры воздуха в начале выработки, таким образом:

$$[T_a(x, t)]_{x=0} = T_{a0}. \quad (5)$$

Вся система уравнений дополняется начальными условиями для

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

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

Нестационарная цилиндрическая задача решается с помощью преобразований Лапласа. 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  $Re(p) > 0$ .

Решение дает зависимость:

$$\tau_a = \frac{\bar{w}}{\varphi(p)} + \left( T_{a0} - \frac{\bar{w}}{\varphi(p)} \right) e^{-\frac{\omega(p) \cdot x}{a}}, \quad (6)$$

которая совпадает с формулой для теплообмена без источников тепловыделения.

Восстановление оригинала

$$T_a(x, t) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot i} \cdot \int_{x-i\infty}^{x+i\infty} e^{pt} \cdot \tau_a(p, x) \cdot dp, \quad (7)$$

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:

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

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

Полученные формулы (6)-(7) позволяет рассчитывать температуру воздуха как функцию времени и продольной координаты.

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. Для разработки корректной модели теплообменных процессов в горных выработках, способной учитывать

нестационарную природу техногенных источников тепловыделений, проведены натурные исследования переходных тепловых режимов в процессе отключения электрооборудования.

В рамках работы непрерывно измерялись показания относительной влажности, температуры воздуха по сухому термометру, а также расход воздуха в столбе лавы №4-1 рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий». Все измерения проводились в двух режимах работы лавы — добычном и ремонтном. Принципиальная схема проветривания лавы представлена на рисунке 1.

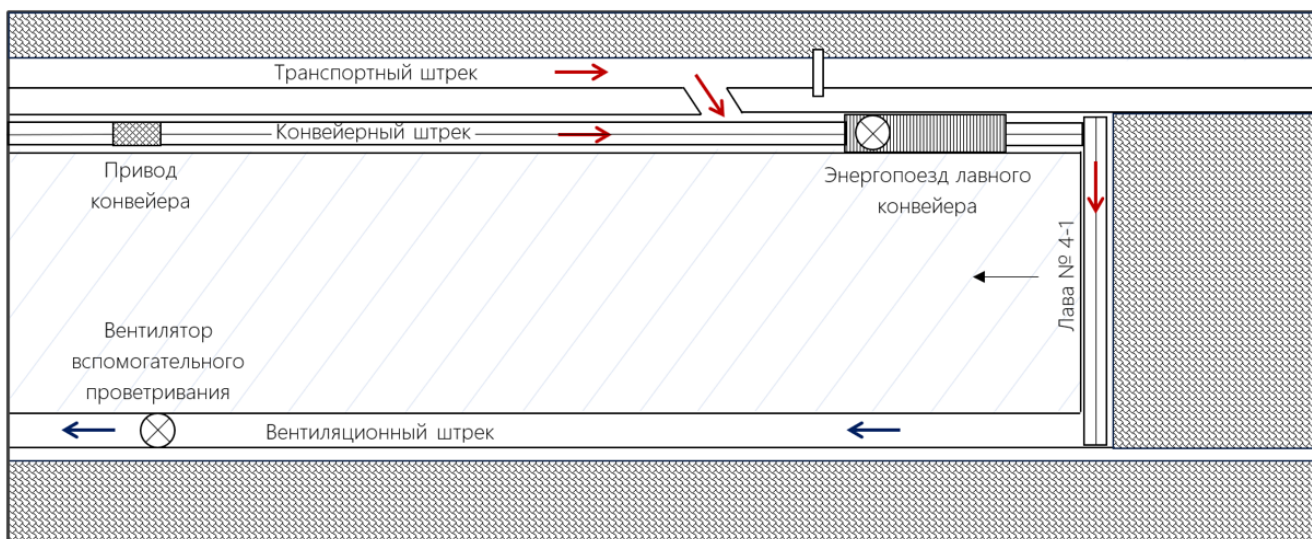


Рисунок 1 — Принципиальная схема проветривания лавы №4-1

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

$$W = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T, \quad (9)$$

где  $c$  — массовая теплоемкость воздуха, принимается равной 1,005 кДж/(кг·°С);  $\rho$  — плотность воздуха, принимается равной 1,25 кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  — расход нагреваемого объема воздуха (м<sup>3</sup>/с);  $\Delta T$  — разница температур воздуха до и после взаимодействия с источником тепловыделений (°С).

Снижение температуры воздуха в исследуемые ремонтные смены можно условно разделить на два этапа (рисунок 2).

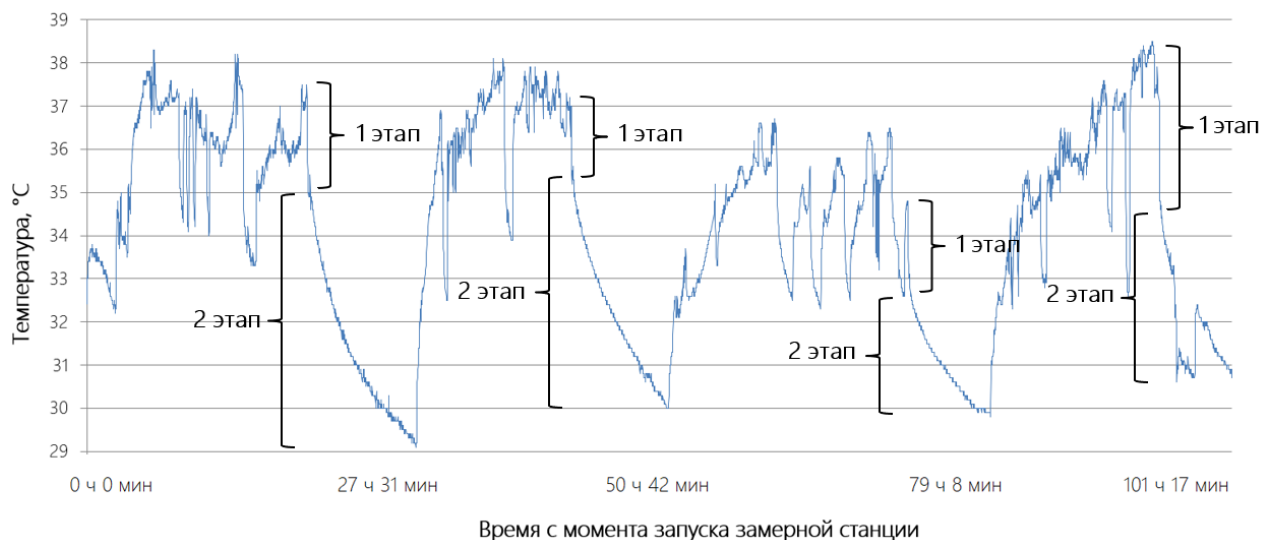


Рисунок 2 — Этапы снижения температуры воздуха

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 (10):

$$T = T_0 + \Delta T \cdot e^{-a \cdot t}, \quad (10)$$

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.

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. Эта формула имеет вид:

$$T_K = T_{II} + (T_H - T_{II}) \cdot e^{-\frac{K \cdot P \cdot L}{c \cdot \rho \cdot Q}}, \quad (11)$$

где  $T_K$ ,  $T_H$ ,  $T_{II}$  — соответственно температуры воздуха в конце и начале горной выработки, температура непо потревоженного 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.

Вычисленные аппроксимирующие кривые для эмпирической зависимости уравнения температуры воздуха от времени для исследуемых режимов проветривания лавы № 1 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:

$$\tau = \frac{1}{a}. \quad (12)$$

Экспериментальные исследования подтвердили, что нагрев воздуха при работе конвейеров и нестационарный характер тепловыделений от оборудования являются существенными факторами, оказывающими влияние на микроклимат рабочих зон в длинных очистных забоях, являются. Данные факторы должны учитываться при разработке моделей тепломассообменных процессов в длинных очистных забоях.

## II научное положение

*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.*

В модели рассматривается система горных выработок лавы (рисунок 3). Движение воздушных потоков в этой системе горных выработок предполагается установившимся и неизотермическим. Воздух поступает в лаву по транспортному и конвейерному штрекам, далее через последнюю 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 лаву и движется по ней, после чего сбрасывается на вентиляционный штрек. В процессе движения по лаве воздушный поток контактирует с породным массивом, вследствие чего происходит теплообмен между массивом и воздухом.

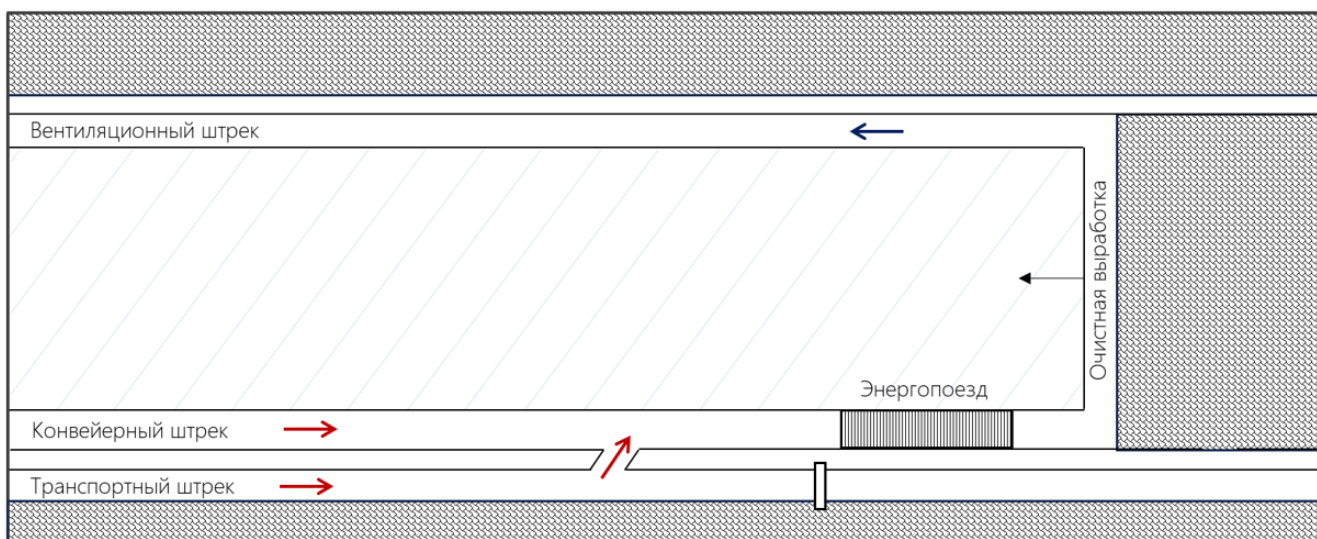


Рисунок 3 — Схема горных выработок лавы

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:

$$\rho_T \cdot c_T \cdot V_T \cdot \frac{\partial T_T}{\partial t} = W + (T_B - T_T) \cdot \alpha \cdot S + k(T_B - T_T), \quad (13)$$

где  $\rho_T$  – плотность поверхности источника тепловыделения, кг/м<sup>3</sup>;  $c_T$  – теплоемкость источника тепловыделения, Дж/(кг·°C);  $T_T$  – температура поверхности источника тепловыделения, °C;  $W$  – мощность тепловыделений источника, Вт;  $T_B$  – температура воздуха, °C;  $\alpha_{eff}$  – коэффициент теплоотдачи от работающего источника тепловыделений к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S$  – 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:

$$\alpha_{eff} = \alpha + \frac{k}{S}. \quad (14)$$

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.

Параметр экспоненты, отвечающий за скорость снижения температуры при выключении оборудования, определяется выражением:

$$A = \frac{\alpha P}{\rho_T c_T Q}, \quad (1)$$

где  $P$  – периметр источника тепловыделений, м;  $Q$  – количество воздуха, подаваемого на проветривание выработки, м<sup>3</sup>/с.

Параметр экспоненты, отвечающий за скорость увеличения температуры при включении оборудования, определяется выражением:

$$B = \frac{(\alpha + \frac{k}{S}) P}{\rho_T c_T Q}, \quad (16)$$

При учете теплоты энергопоезда уравнение (8) теплопереноса в горной выработке модифицируется следующим образом:

$$\rho_B \cdot c_B \cdot \left( S_B \cdot \frac{\partial T_B}{\partial t} + Q_B \cdot \frac{\partial T_B}{\partial x} \right) = (T_T - T_B) \cdot \alpha_{eff} \cdot P + (T_M - T_B) \cdot \alpha_M \cdot P_M. \quad (17)$$

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что градиенты температур в окружающем породном массиве в радиальном направлении обычно на 1-2 порядка выше, чем в направлении, совпадающем с осью горной выработки. По данной причине, модель дополняется уравнением кондуктивного теплопереноса в породном массиве в следующем виде:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T_M}{\partial t} = \lambda_R \cdot \left( \frac{\partial^2 T_M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_M}{\partial r} \right). \quad (18)$$

Данное уравнение дополняется граничными условиями теплообмена на границе с горной выработкой:

$$\lambda_R \cdot \frac{\partial T_M}{\partial r} = (T_B - T_M) \cdot \alpha_M \cdot P_M, \quad (19)$$

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

и условием непо потревоженного породного массива на заданном удалении от горной выработки:

$$T_M = T_M^{(0)}, \quad (20)$$

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

Начальные условия по температуре массива описываются выражением:

$$T_M \Big|_{t=0} = T_M^{(0)} \quad (21)$$

Граничные и начальные условия по температурам воздуха и техники, необходимые для замыкания системы уравнений (13), приведены ниже:

$$T_B(t, 0) = T_{in}, \quad (22)$$

$$T_B(0, x) = T_T(0) = T_0, \quad (23)$$

где  $T_{in}$  – температура воздуха, поступающая к участку энергопоезда после теплообмена с конвейерной линией, °С.

Разработанная динамическая модель позволяет строить распределение температур воздуха в пространстве и времени для длинного очистного забоя с учетом режимов работы тепловыделяющего оборудования. Результатом моделирования выступает рассчитанное поле температур для участка конвейерного штрека (участок от начала энергопоезда до сопряжения с забоем лавы) и забоя лавы представленные на рисунке 4. Также на рисунке представлены расхождения полученных значений с данными дискретных измерений.

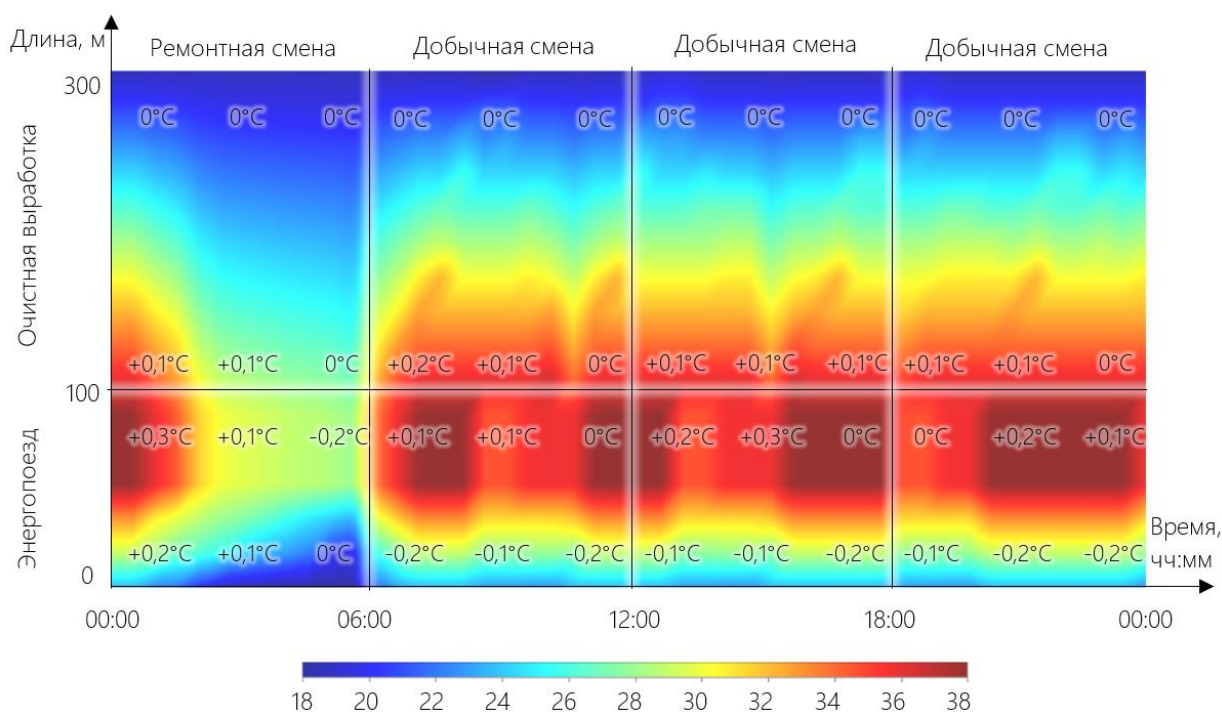


Рисунок 4 — Результаты моделирования

Установлено, что наибольшую температуру воздух принимает на сопряжении конвейерного штрека и лавы. При движении воздуха по лаве происходит его теплообмен с породным массивом, в результате которого большая часть саккумулированного тепла переходит в массив, в результате чего температура воздуха в районе сопряжения лавы с вентиляционным штреком принимает значения близкие к температуре нетронутого массива.

Результаты моделирования подтверждают установленную в ходе замеров зависимость: снижение температуры воздуха после выключения оборудования происходит не мгновенно.

Организация работ в очистных забоях калийных рудников осуществляется согласно утвержденным планограммам. Планограмма составляется для определенного периода времени, чаще всего для одной смены или суток, и включает в себя основные процессы, осуществляемые в забое: выемка соли, передвижение секций крепления, подвигание конвейера, отгон комбайна, ремонт оборудования, работы выполняемые на сопряжении лавы с энергопоездом.

Сопоставив данные планограммы и распределение температуры воздуха можно определить уровень теплового стресса работника. На рисунке 5 представлена реальная планограмма лавы, совмещенная с полученным распределением температур.

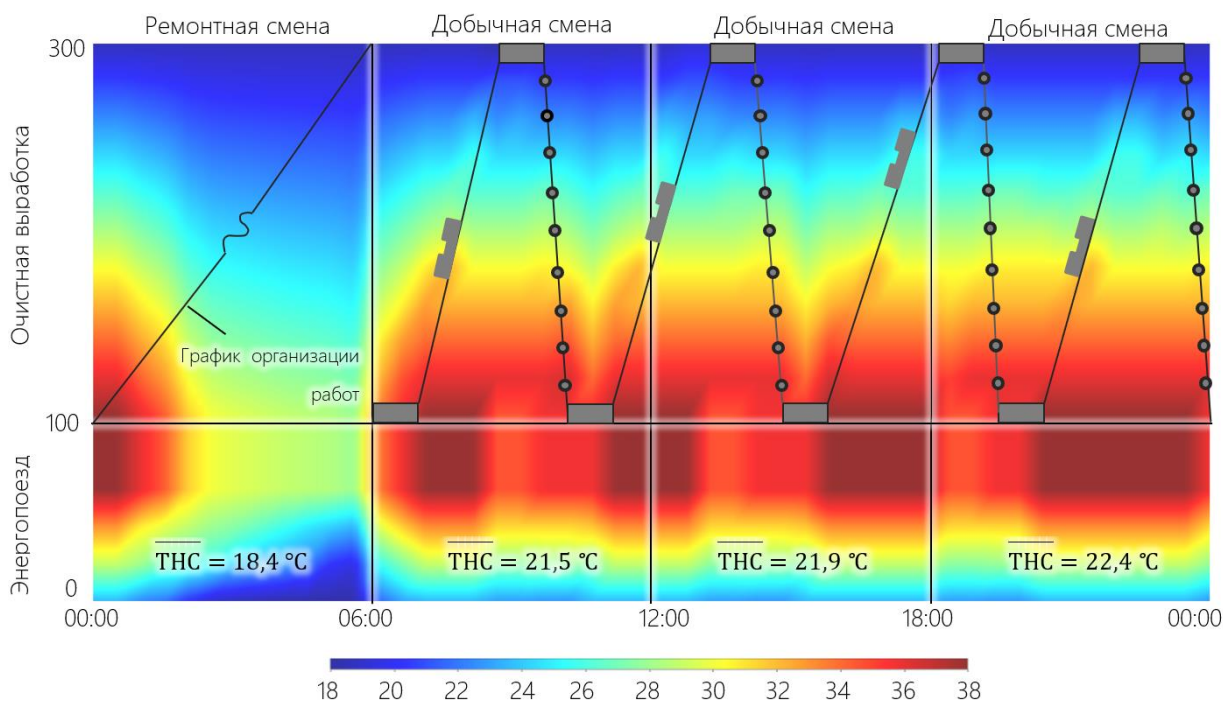


Рисунок 5 — Расчет тепловой нагрузки

Предложенный подход может быть использован для оценки уровня тепловой нагрузки в существующих забоях без необходимости оборудования работников средствами измерения параметров микроклимата.

Кроме того, разработанная модель может использоваться для прогноза тепловой нагрузки в перспективных рабочих зонах в целях своевременной разработки мероприятий по снижению тепловой нагрузки в рабочих зонах и как следствие:

1. предотвращения возможности перегрева, тепловых стрессов и других опасных ситуаций, которые могут повлиять на здоровье рабочих;
2. избежания аварийных остановок оборудования, вызванных перегревом оборудования;
3. повышения производительности труда и эффективности производства;
4. оптимизации затрат на реализацию мероприятий по нормализации микроклимата.



### III научное положение:

*Комплексирование 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.*

На рисунке 6 представлены результаты измерения температуры в очистной выработке и в примыкающим к ней выработкам. Из рисунка видно, что температуры воздуха при его движении от конвейерного к вентиляционному штреку 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, необходимо предусматривать системы охлаждения воздуха поскольку имеется 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.

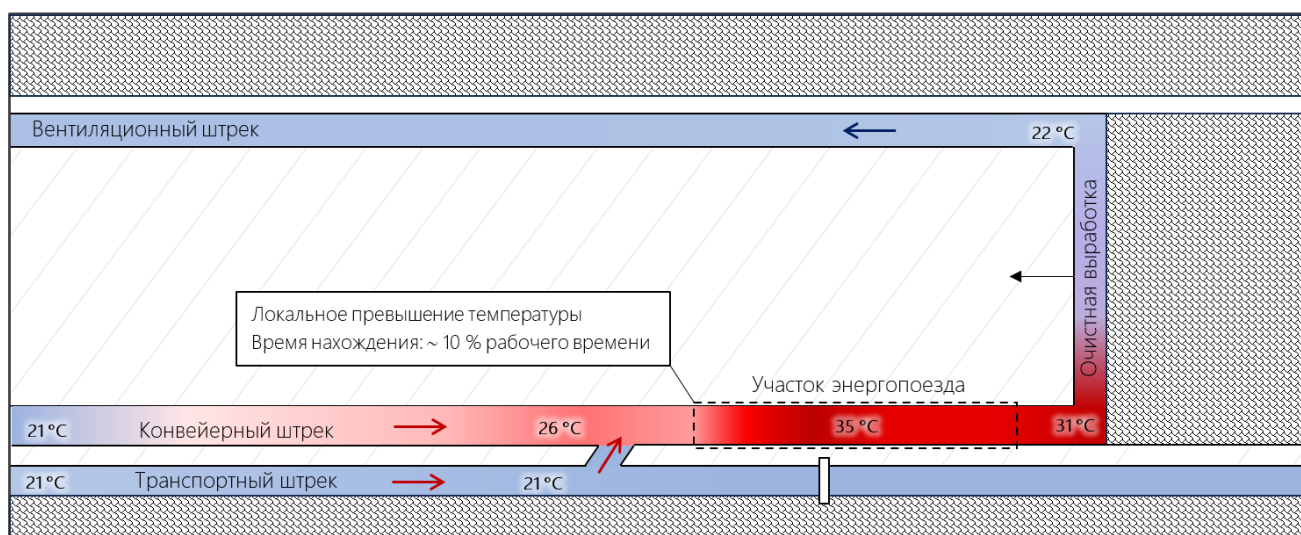


Рисунок 6 — Результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в длинном очистном забое

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. 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.

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, °C;

$t_{\text{сух}}$  — температура воздуха по сухому термометру, °C.

Определение величины температуры воздуха по влажному термометру может быть осуществлено на основании I-d диаграммы состояния влажного воздуха при известных

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 индекса ТНС (сочетания температуры и относительной влажности воздуха).

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).

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.

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

Рассмотрим изменение параметров микроклимата в длинном очистном забое калийного рудника в течение смены (рисунок 11).

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.

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.

Учет первых трех факторов осуществляется на основании модели, разработанной в рамках 2 научного положения.

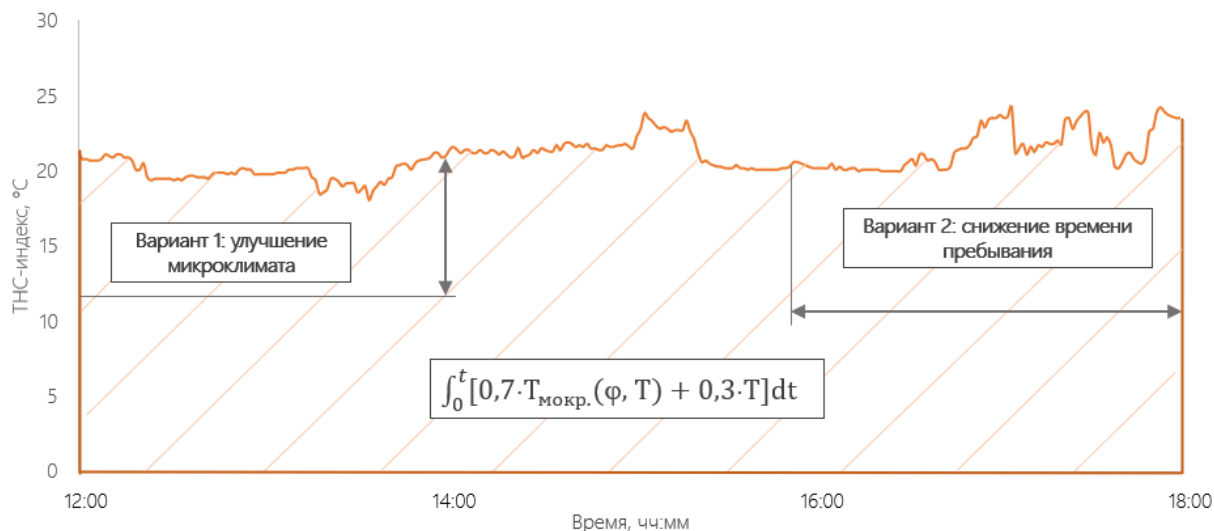


Рисунок 7 — Управление тепловой нагрузкой

Данные о местонахождении работников в течение рабочей смены могут быть получены на основании планограммы.

Таким образом, управление для эффективного управления тепловым режимом необходимо соблюдение двух условий:

1. Параметры микроклимата в рабочей зоне не должны создавать опасные условия.
2. Среднесменная (накопленная) тепловая нагрузка должна быть допустимой.

В случае если параметры микроклимата в рабочей зоне не удовлетворяют первому условию, работы в такой рабочей зоне запрещены и единственным мероприятием является улучшение параметров микроклимата путем установки систем кондиционирования воздуха.

Учета последних трех факторов осуществляется на основании модели, разработанной в рамках второго научного положения. 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 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 системами кондиционирования воздуха (СКВ) либо решения по ротации рабочих между забоями. 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.

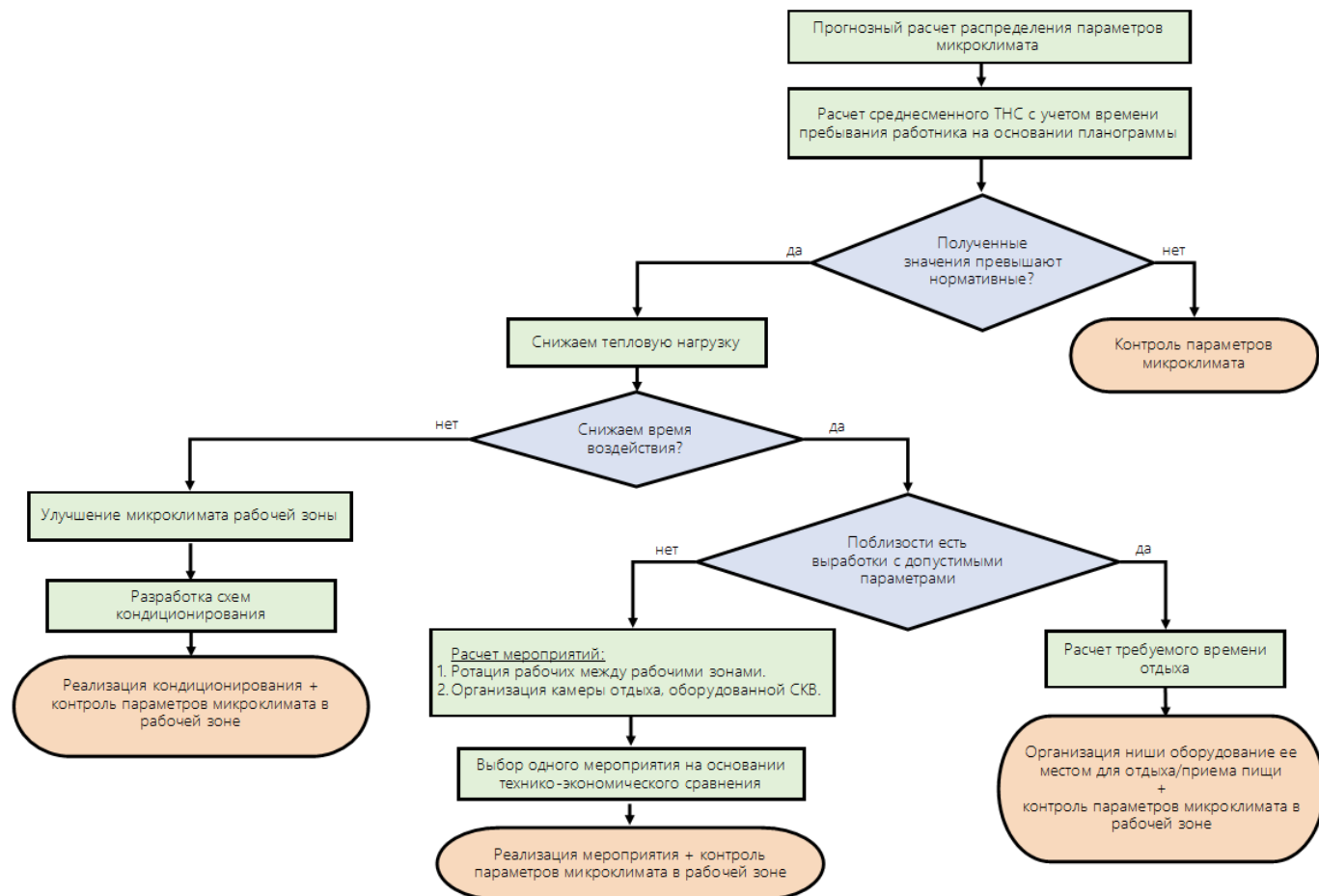


Рисунок 8 — Порядок выбора мероприятий, направленных на снижение влияния нагревающего микроклимата

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.

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

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

1. 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. – DOI 10.46689/2218-5194-2021-4-1-145-158
2. 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. – Т. 7, № 1. – С. 37-48. – DOI 10.17073/2500-0632-2022-1-37-48
3. Семин М.А., Головатый И.И., Бородавкин Д.А. Анализ методов расчета теплоотдачи между хладоносителем в замораживающей колонке и окружающими породами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 3. – С. 154-163. – DOI 10.18799/24131830/2022/3/3032
4. Зайцев А.В., Бородавкин Д.А., Бублик С.А., Агеева К.М. Исследование температуры массива горных пород Березовского рудника ОАО "Беларуськалий" // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 7. – С. 76-85. – DOI 10.18799/24131830/2022/7/3421
5. Бородавкин Д.А., Зайцев А.В., Паршаков О.С., Хохряков Д.С. Экспериментальное исследование условий труда подземных рабочих в нагревающем микроклимате глубокого полиметаллического рудника // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 2. – С. 69-75. – DOI 10.24000/0409-2961-2023-2-69-75
6. Гришин Е.Л., Бородавкин Д.А., Петровский А.Б., Долгих А.С. Факторы проветривания рабочих зон рудников ОАО «Беларуськалий» // Горный журнал. – 2023. – № 8. – С. 50-56. – DOI 10.17580/gzh.2023.08.07
7. 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. – Т. 8. – №. 2. – С. 67. – DOI 10.3390/fluids8020067

**Публикации в других изданиях**

8. Бородавкин Д.А. К вопросу нормирования микроклиматических условий на калийных рудниках ОАО "Беларуськалий" // Горное эхо. – 2021. – № 4(85). – С. 96-101. – DOI 10.7242/echo.2021.4.19
9. 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(78). – С. 72-79. – DOI 10.7242/echo.2020.1.16

10. Бородавкин Д.А., Зайцев А.В. Моделирование теплообмена в системах воздухоподготовки шахт и рудников // Горное эхо. – 2019. – № 4(77). – С. 101-104. – DOI 10.7242/echo.2019.4.21
11. Попов М.Д. Метод расчета нагрева воздушной струи в системах воздухоподготовки шахт и рудников и его интеграция в аналитический комплекс «Аэросеть» / Попов М.Д., Бородавкин Д.А., Шалимов А.В., Семин М.А. // Сборник трудов седьмой Российской национальной конференции по теплообмену. – Москва, 2018. – С. 179-181

---

Сдано в печать \_\_\_\_\_ 2024 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А