

На правах рукописи



Суханов Андрей Евгеньевич

**ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ РАБОЧЕГО
МЕСТА МАШИНИСТА ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА В УСЛОВИЯХ
КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ**

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2026

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») и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ).

Научный руководитель: **Левин Лев Юрьевич**,
член-корреспондент РАН, доктор технических наук, доцент,
директор «ГИ УрО РАН» (г. Пермь).

**Официальные
оппоненты:** **Кобылкин Сергей Сергеевич**
доктор технических наук, профессор кафедры безопасности и
экологии горного производства Федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС» (г. Москва).

Фазылов Руслан Робертович
кандидат технических наук, ассистент кафедры безопасности
производств Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-
Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II» (г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждения науки
Федеральный исследовательский центр "Якутский научный
центр Сибирского отделения Российской академии наук"
Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского
Сибирского отделения Российской академии наук (г. Якутск)

Защита диссертации состоится «24» сентября 2026 года в _____ 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://permisc.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 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 его.

Отзывы необходимо отправлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А,
Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02, E-mail: lsereg@mi-perm.ru

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук



Лобанов С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Вовлечение в промышленную разработку новых запасов полезных ископаемых, включая глубокозалегающие горизонты, обуславливает усложнение организации ведения горных работ, прежде всего в части обеспечения безопасных микроклиматических и аэрологических параметров. К числу факторов, формирующих данные условия можно отнести: высокие температуры массива, большую протяженность и разветвленность вентиляционных сетей, горное давление, непредсказуемость залегания пласта с полезным ископаемым и другие неблагоприятные факторы.

Данное исследование направлено на решение задач, связанных с нормализацией микроклиматических параметров в проходческих и добычных рабочих зонах глубоких калийных рудников. В настоящее время глубина отработки калийных месторождений в Российской Федерации и странах СНГ достигает отметки -1200 м. Для таких глубин характерна высокая температура горных пород, обуславливающая теплопритоки от вмещающего массива в рудничную атмосферу горных выработок. Работа высокопроизводительного оборудования также оказывает негативное влияние на тепловую обстановку. Фиксируемые температуры воздуха на глубоких калийных рудниках достигают 39°C при допустимом значении 26°C, установленным требованиями Федеральных норм и правил (ФНиП). По мере увеличения глубины отработки и отдаления рабочих зон относительно стволов ситуация будет только усугубляться.

Вопросы нормализации теплового режима в горных выработках рассмотрены в исследованиях таких ученых как Щербань А.Н., Медведев Б.И., Воропаев А.Ф., Дядькин Ю.Д., Галкин А.Ф., Смирнов Ю.М., Гендлер С.Г., Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Файнбург Г.З., Кобылкин С.С., Фазылов И.Р., Бородавкин Д.А., Ольховский Д.В., M.J. McPherson, K.L. Gibson, S.J., Bluhm, L. Maskau и др. Ограниченные ранее возможности вычислительной техники приводили к развитию преимущественно приближенных методов расчета теплового режима. Современные же подходы к проведению научных исследований позволяют использовать средства трехмерного численного моделирования в стационарной и нестационарной постановках задач, что открывает новые возможности для высокоточного прогнозирования управления микроклиматом.

В связи с вышеизложенным, актуальность темы диссертационной работы обусловлена объективной потребностью в научном обосновании и разработке новых систем управления тепловым режимом в ограниченном пространстве, позволяющих нормализовать параметры теплового режима на рабочем месте машиниста проходческо-очистного комбайна в условиях интенсивных тепловыделений.

Цель работы

Нормализация микроклиматических параметров на рабочих местах машинистов проходческо-очистных комбайнов калийных рудников.

Основная идея работы

Управление тепловым режимом в ограниченном пространстве тупиковой горной выработки, основанное на перераспределении воздушных потоков и изменении их термодинамических параметров за счёт применения системы локального охлаждения и всасывающего способа проветривания.

Основные задачи работы

1. Исследование распределения температур и скоростей воздуха в призабойном пространстве тупиковых выработок при работающем и неработающем проходческо-очистном комплексе.
2. Мониторинг изменения температурного режима в тупиковой комбайновой выработке при разных способах проветривания и при выполнении технологических процессов.
3. Формулировка трехмерной модели тепломассопереноса, учитывающей влияние работы добычного оборудования и тепловых факторов, предназначенной для расчета распределения полей температуры и потоков воздуха на рабочем месте машиниста комбайна.
4. Оценка влияния источников тепловыделения оборудования проходческо-очистного комплекса на формирование теплового режима тупиковой горной выработки.
5. Разработка технических решений, направленных на нормализацию микроклиматических параметров на рабочем месте машиниста проходческо-очистного комбайна.

Методы исследования

Работа выполнена при использовании научных методов исследования, включающих в себя анализ отечественных и зарубежных источников; натурные исследования микроклиматических параметров тупиковых комбайновых горных выработок; сбор и статистический анализ данных; трехмерное многовариантное моделирование тепломассопереноса в атмосфере призабойного пространства, анализ полученных результатов моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Синтезированная математическая модель тепломассопереноса, объединяющая одномерное описание процессов в тупиковой выработке и трехмерное численное моделирование в ограниченном призабойном пространстве, позволяет установить закономерности формирования температурных полей в рабочей зоне комбайна при различных аэродинамических режимах.

2. Горнотехнический способ регулирования теплового режима, основанный на всасывающем способе проветривания тупиковой выработки, обеспечивает снижение температуры в призабойном пространстве за счет устранения дополнительного теплопритока от нагнетательного вентилятора и локализованного отвода нагретых воздушных масс по вентиляционному трубопроводу.
3. Система управления тепловым режимом на рабочем месте машиниста комбайна, включающая организацию локальной подачи и направленного распределения охлажденного воздуха, обеспечивает нормализацию микроклиматических параметров в ограниченном объеме призабойного пространства.

Научная новизна

1. Разработана синтезированная математическая модель тепломассопереноса в призабойном пространстве для условий тупиковой комбайновой выработки калийного рудника, базирующаяся на совместном решении задач в одномерной и трехмерной постановках.
2. Выполнена оценка влияния движения самоходного вагона и периодичности работы электрических приводов добычного комбайна на проветривание и тепловой режим в призабойном пространстве.
3. Показана эффективность всасывающего способа проветривания тупиковой комбайновой выработки по фактору температурного режима в призабойном пространстве.
4. Определены параметры системы охлаждения воздуха на рабочем месте машиниста комбайна, позволяющие, обеспечить допустимые температуры воздуха, минимизируя холодопроизводительность.
5. Разработана методика обоснования параметров системы локального охлаждения воздуха на рабочем месте машиниста проходческо-очистного комбайна.

Достоверность научных положений

Достоверность подтверждается соответствием законам рудничной аэрогазодинамики и законам теплообмена, сопоставимостью результатов численного моделирования с большим объемом данных, полученных в ходе натурных замеров на подземном руднике Гремячинского ГОК, а также согласованностью полученных зависимостей с результатами, представленными в научной литературе.

Практическое значение и реализация результатов исследований

Результаты проведенных исследований положены в основу проектирования системы локального кондиционирования воздуха на рабочем месте машиниста проходческо-очистного комбайна в условиях глубоких тупиковых выработок калийных рудников. Разработанная система направлена на нормализацию микроклимата с учетом тепловых воздействий от окружающего массива горных пород и технологического оборудования. Полученные

решения, разработанные с учетом условий ведения горных работ на Гремячинском и Старобинском месторождениях, также могут быть использованы при проектировании систем кондиционирования воздуха на других калийных рудниках с аналогичными горно-геологическими и горнотехническими условиями.

С целью соблюдения требований правил безопасности при внедрении предлагаемой системы выполнен научный задел для разработки обоснования безопасности опасного производственного объекта (ОБ ОПО) в части изменения способа проветривания тупиковой выработки. На исследуемом объекте документ прошёл экспертизу промышленной безопасности и предусматривает возможность применения всасывающего способа проветривания в тупиковых выработках рудника.

Совместно с «НПО «Аэросфера» выполнено научное сопровождение разработки и стендовые заводские испытания холодильной машины КШВ-15. Разработанное оборудование выступает в качестве основы системы локального кондиционирования воздуха в рабочем пространстве машиниста комбайна.

Связь работы с крупными научными программами и темами

Работа выполнена в соответствии с государственными планами научных исследований «ГИ УрО РАН» в рамках проекта «Мониторинг, моделирование и управление аэрологическими и теплофизическими процессами в сложных горно-технических системах» выполненных при финансовой поддержке Минобрнауки России (рег. номер НИОКТР: 126012716039-2) и в соответствии с тематикой хоздоговорных работ для предприятия АО «МХК «ЕвроХим».

Также исследования по теме работы были поддержаны и частично финансированы в рамках крупного научного проекта при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Апробация работы

Результаты исследований и разработанные научные положения докладывались и подвергались обсуждению на ежегодных научных сессиях Горного института Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь, ГИ УрО РАН, 2024, 2025 гг.), на международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, НИТУ МИСИС, 2022, 2024 гг.), на XIX международном форум-конкурсе студентов и молодых ученых "Актуальные проблемы недропользования (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2023 г.), на отчетных конференциях по итогам 1 и 2 этапов выполнения крупного научного проекта по Соглашению с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2024-535 от 23 апреля 2024 г (г. Пермь, ИМСС УрО РАН, 2024, 2025 гг.), на XXIV Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, ИМСС УрО РАН, 2025 г.), на всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2026 г.), на научно-технических советах рудника Гремячинского ГОК (г. Котельниково, ООО «ЕвроХим-

ВолгаКалий, 2022 - 2025 гг.), на научно-технических советах «НПО «Аэросфера» (г. Пермь, «НПО «Аэросфера», 2024, 2025 гг.).

Публикации

По теме диссертационной работы подготовлено и опубликовано 13 печатных работ, в том числе 7 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК, 8 в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков и 27 таблиц. Список использованных источников состоит из 131 наименования, в том числе 51 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I научное положение:

Синтезированная математическая модель тепломассопереноса, объединяющая одномерное описание процессов в тупиковой выработке и трехмерное численное моделирование в ограниченном призабойном пространстве, позволяет установить закономерности формирования температурных полей в рабочей зоне комбайна при различных аэродинамических режимах.

Для исследования температурного режима в призабойном пространстве тупиковых комбайновых горных выработок калийных рудников разработана синтезированная модель, включающая в себя одномерную и трехмерную постановки задачи, с учетом факторов, оказывающих значимое влияние на формирование микроклимата. Предлагаемый подход позволяет выполнять расчеты как для эксплуатируемых рудников, так и для проектируемых объектов и участков. В первом случае граничные условия для моделирования можно получить путем проведения экспериментальных исследований. Второй случай не позволяет выполнить серию натурных замеров, для этого необходимо разработать синтезированную модель в одномерной и трехмерной постановках задачи. Одномерное моделирование тепломассопереноса обеспечивает расчет граничных условий для последующего трехмерного численного расчета на основе известных значений естественного геотермического градиента массива и технических параметров планируемых к установке вентиляторов местного проветривания.

Одномерная постановка задачи.

Разработана математическая модель «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода», которая способна учитывать тепловыделения от техногенных источников и лучистый теплообмен.

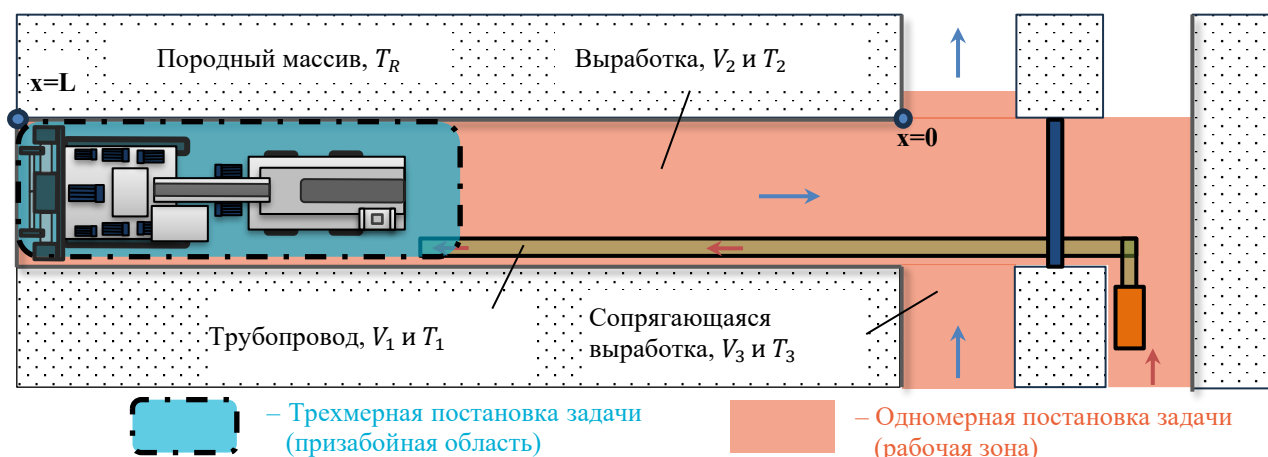


Рисунок 1 – Графическая постановка задачи (вид сверху)

Принятый подход позволяет учитывать основные механизмы передачи тепла. Теплоперенос внутри вентиляционного трубопровода описывается одномерным уравнением конвективного переноса теплоты с учетом теплообмена между воздушным потоком и

внутренней поверхностью вентиляционного трубопровода, с учетом распределенных по длине тепловыделений:

$$G_1 \cdot c \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} = (T_{wo} - T_1) \cdot k_{wi} \cdot \pi + q(x), \quad (1)$$

где G_1 – массовый расход воздуха в трубопроводе, кг/с; c – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C); T_1 – температура воздуха в трубопроводе, °C; T_{wo} – температура наружной поверхности трубопровода, °C; k_{wi} – коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке трубопровода, Вт/(м²·°C); $q(x)$ – удельная тепловая нагрузка, Вт/м.

Тепловое состояние воздуха в горной выработке оценивается конвективным переносом тепла вдоль выработки и теплообменом с поверхностью вентиляционного трубопровода, согласно уравнению:

$$G_2 \cdot c \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} = (T_{wo} - T_2) \cdot a_{wo} \cdot P_{wo} + (T_R - T_2) \cdot a_R \cdot P_R + q(x), \quad (2)$$

где G_2 – массовый расход воздуха в выработке, кг/с; T_2 – температура воздуха в выработке, °C; a_{wo} – коэффициент теплоотдачи воздуха снаружи вентиляционного трубопровода, Вт/(м²·°C); P_{wo} – периметр наружной стенки трубопровода, м; T_R – температура породного массива, °C; T_2 – температура воздуха в выработке, °C; a_R – коэффициент теплоотдачи воздуха на поверхности выработки, Вт/(м²·°C); P_R – периметр горной выработки, м.

Описание нестационарного теплопереноса в окружающем породном массиве выполнено с использованием уравнения теплопроводности в цилиндрической системе координат. Данное уравнение позволяет учитывать накопление и отдачу теплоты породным массивом, что особенно важно при анализе длительных режимов проветривания и оценки тепловой инерции горных выработок:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T_r}{\partial t} = \lambda_R \cdot \left(\frac{\partial^2 T_r}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_r}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где p – плотность, кг/м³; t – время, с.; λ_R – теплопроводность породного массива, Вт/(м·°C); r – радиус выработки, м.

Связь между тепловыми потоками учитывается через уравнения теплового баланса:

$$q_1 = q_2 + q_3, \quad (4)$$

где q_1 – тепловой поток от воздуха в трубопроводе:

$$q_1 = (T_{wo} - T_1) \cdot k_{wi} \cdot \pi, \quad (5)$$

q_2 – тепловой поток между поверхностью трубопровода и воздухом в выработке за счет конвективного теплообмена:

$$q_2 = (T_2 - T_{wo}) \cdot a_{wo} \cdot P_{wo}, \quad (6)$$

q_3 – тепловой поток между поверхностью трубопровода и стенками выработки за счет лучистого теплообмена:

$$q_2 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot P_{wo} \cdot \left[\left(\frac{T_R + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_R + 273.15}{100} \right)^4 \right]. \quad (7)$$

Модель позволяет учитывать теплообмен, возникающий при прохождении воздушного потока через зону сопряжения выработок, в которой располагается вентиляционный трубопровод. При выполнении расчета теплообмена в зоне сопряжения слагаемое q_2 в уравнении (4) видоизменяется и выглядит следующим образом:

$$q'_2 = (T_3 - T_{wo})\alpha'_{wo}P_{wo}, \quad (8)$$

где T_3 – температура в сопрягающейся выработке, °С.

Реализация описанной математической модели и алгоритмов построения геометрии рассматриваемой области осуществлена в программе TES.

Трехмерная постановка задачи

Для выполнения расчета требуемых параметров системы охлаждения воздуха рабочего места машиниста комбайна необходим детальный анализ результатов распределения полей температур и скоростей в исследуемой области. Ввиду этого разработана трехмерная CFD модель тупиковой выработки и расчета протекающих в ней процессах. Для настройки модели учтены следующие параметры: температура нетронутого массива, температура поверхности добычного оборудования, мощность и температуры поверхности вентилятора местного проветривания, геометрические параметры горной выработки, геометрические параметры добычного оборудования, схема горных выработок, расходы воздуха в выработке и в вентиляционном трубопроводе.

Общий вид разработанной геометрии исследуемой области представлен на рисунке 2.

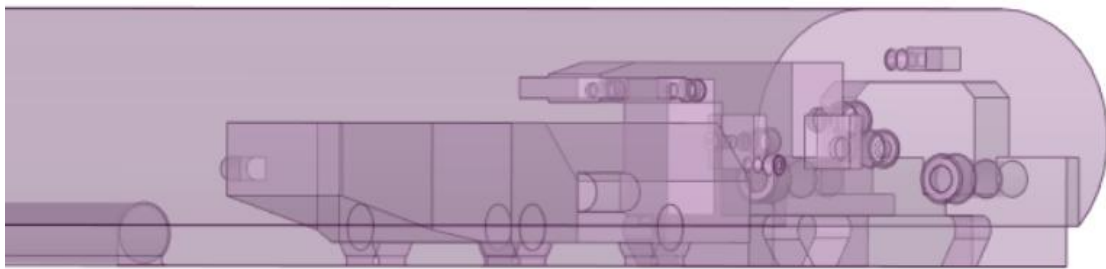


Рисунок 2 – Общий вид построенной геометрии исследуемой области

Численное решение в разрабатываемой модели строится на базе системы уравнений Навье – Стокса осредненных по Рейнольдсу (RANS), которые являются формой законов сохранения массы, импульса и энергии.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ \quad + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}), \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right], \end{array} \right. \quad (9)$$

где u_i – вектор осредненной по Рейнольдсу скорости воздуха, м/с; $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ – тензор турбулентных напряжений Рейнольдса, Па; $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i u_i}{2}$ – удельная полная энергия

воздуха, Дж/кг; h – удельная энтальпия, Дж/кг; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг·К); μ_t – турбулентная динамическая вязкость, Па·с; Pr_t – турбулентное число Прандтля; $(\tau_{ij})_{eff}$ – эффективный тензор напряжений.

При постановке задачи принята модель турбулентности Realizable $k - \varepsilon$. Валидация численной модели производилась в несколько этапов: выводом зависимости скорости от высоты выработки и наложением экспериментальных точек на график; наложением точек некоторого радиуса на контурные поля и получение средних значений в них; нахождением средней абсолютной погрешности и среднеквадратичного отклонения. Для определения зависимости скорости от высоты выработки были введены прямые на равном удалении от оси симметрии поперечного сечения выработки. В силу наличия пространственной неоднородности поля скорости, которая имела место как в рамках натурного эксперимента, так и при моделировании, было принято решение сравнивать замеренные точки с теоретическими кривыми вдоль нескольких линий, смещенных друг относительно друга на +1 м. По данным линиям выводилась зависимость скорости от высоты выработки, на данную зависимость накладывались экспериментальные значения. На рисунке 3 представлены сравнения значений, полученных в ходе эксперимента и результаты расчета на настроенной модели.

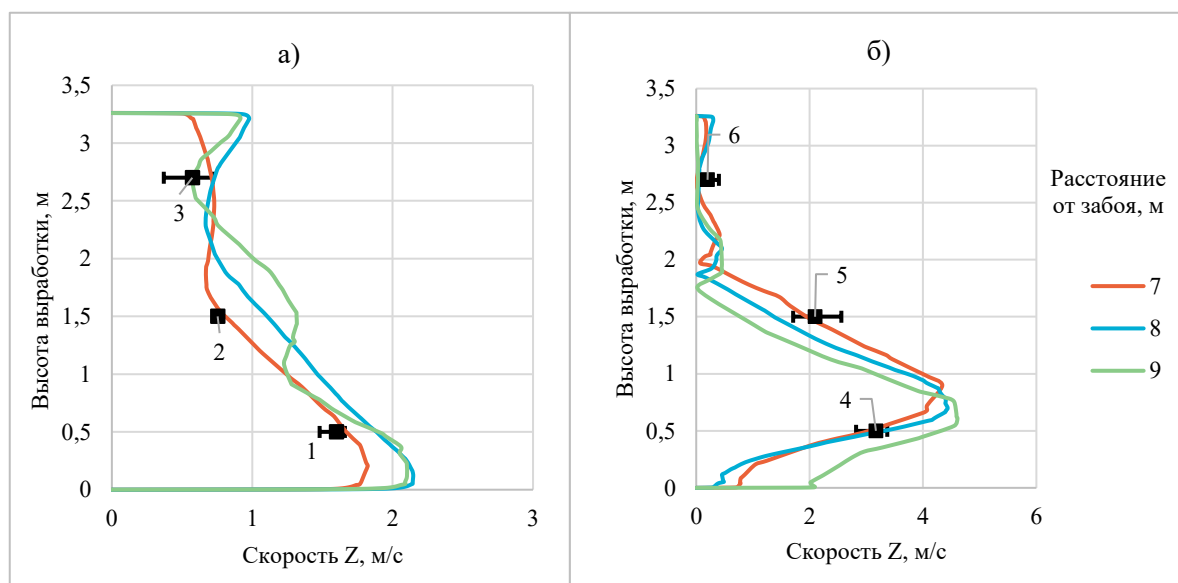


Рисунок 3 – Зависимость скорости от высоты с экспериментальными точками в варианте с вагоном:

а) правая сторона комбайна; б) левая сторона комбайна

Аналогичные сравнения выполнены для ситуации, при которой вагон отсутствует в призабойном пространстве. Средняя ошибка модели по скоростям не превышает 7%, среднеквадратичная ошибка не превышает 8%. Анализ процесса валидации модели в части изменения температур показал, что разность температур в ядре потока, при выполнении расчетов, достигает 1,1 °С. Данный результат соответствует эффекту, который наблюдался в ходе проведения эксперимента. Полученная модель удовлетворительно описывает процесс неизоэнтальпического проветривания тупиковой выработки в ситуациях с работающим и выключенным комбайном.

II научное положение:

Горнотехнический способ регулирования теплового режима, основанный на всасывающем способе проветривания тупиковой выработки, обеспечивает снижение температуры в призабойном пространстве за счет устранения дополнительного теплопритока от нагнетательного вентилятора и локализованного отвода нагретых воздушных масс по вентиляционному трубопроводу.

Опытно-промышленные испытания всасывающего способа проветривания позволили зафиксировать снижение температуры воздуха в призабойном пространстве тупиковой комбайновой выработки. Это связано с тем, что по тракту движения воздуха исключается один из возможных факторов тепловыделения – нагнетательный вентилятор местного проветривания. Графики полученные в период проведения эксперимента представлены на рисунке 4.

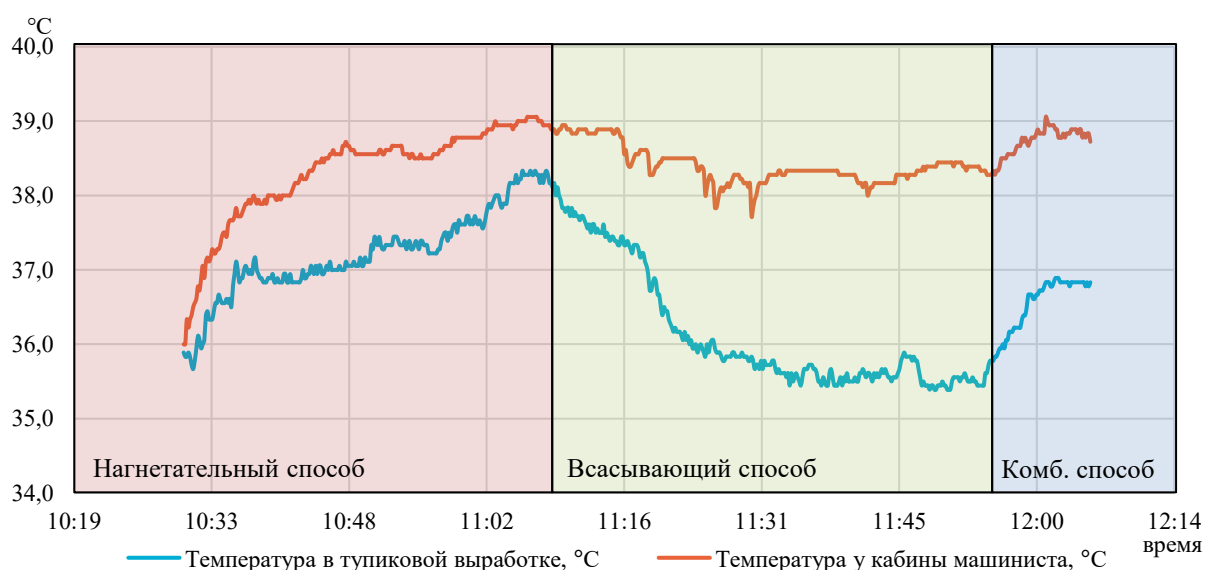


Рисунок 4 – Тренды изменения показаний температуры в исследуемой выработке

Анализ полученных результатов показал, что температура рудничного воздуха в выработке при переходе с нагнетательного на всасывающий способ снижается до 3,5 °C. Организация подачи свежего воздуха к призабойному пространству с пониженной температурой способствует улучшению там теплового режима, как следствие, появляется возможность обеспечить снижение требуемой холодильной мощности разрабатываемой системы охлаждения воздуха.

Решение задачи расчета распределения температур и скоростей воздуха в призабойном пространстве, в условиях всасывающего способа проветривания, возможно при корректировке граничных условий на ранее разработанной модели. Граничные условия, привязанные к давлению, имеют способность пропускать через себя воздух в обе стороны. На входе задается отрицательная скорость, которая имитирует всасывание воздуха, а на выходе воздух поступает в систему. Результаты расчетов распределения полей температур представлены на рисунке 5.

Всасывающий способ:

Нагнетательный способ:

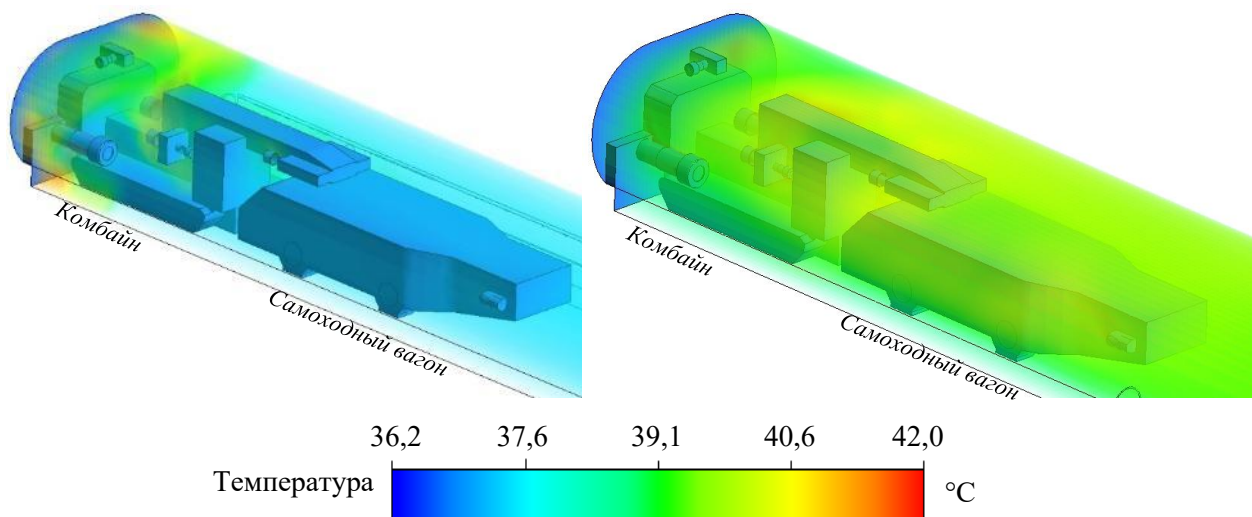


Рисунок 5 – Объемные поля температур при включенном комбайне с вагоном в призабойном пространстве

В целях количественной оценки сравниваемых способов проветривания тупиковой выработки использован интегральный показатель – среднеобъемная температура воздуха $T_{\text{ср}}$, которая рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{V} \int T_i dV, \quad (10)$$

где V – объем исследуемой области (призабойное пространство 50 м от забоя), м^3 , T – поле температур, полученное в результате численного моделирования, $^{\circ}\text{C}$.

Расчет данного параметра позволяет обобщенно охарактеризовать эффективность разных способов проветривания, в условиях включенного комбайна с вагоном в выработке и отключенного комбайна без вагона в выработке. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты расчета среднеобъемной температуры воздуха

Рассматриваемый сценарий	Среднеобъемная температура $T_{\text{ср}}$	
	Всасывающий способ	Нагнетательный способ
При включенном комбайне и с вагоном в призабойном пространстве	37,6 $^{\circ}\text{C}$	39,3 $^{\circ}\text{C}$
При отключенном комбайне без вагона в призабойном пространстве	37,1 $^{\circ}\text{C}$	38,7 $^{\circ}\text{C}$

Для выполнения количественного анализа в части изменения температуры построены графики с изменениями температур по высоте по сечению (рисунок 6).

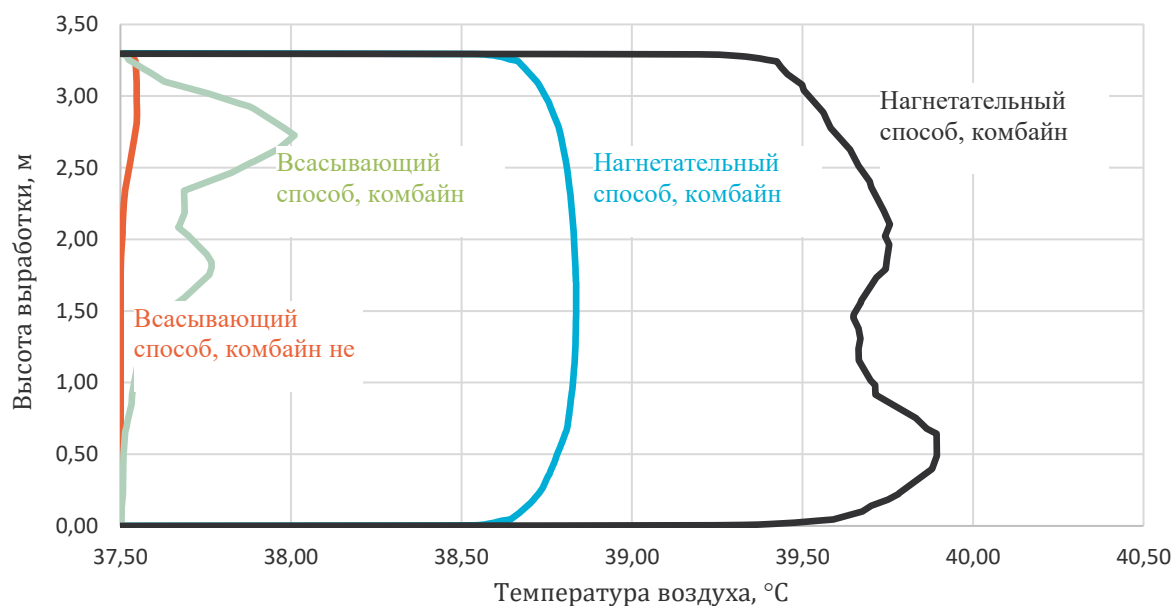


Рисунок 6 – Профили температуры для всех вариантов проветривания

Анализ графиков показывает, что применение всасывающего способа проветривания помогает снизить температуру в выработке минимум на 2 °С.

Нестационарная постановка задачи расчета распределения поля температур и скоростей воздуха позволила оценить влияние движения самоходного вагона на формирование теплового режима в призабойном пространстве. Реализация данного подхода обеспечивается за счёт построения динамических расчетных сеток на базе разработанной ранее трехмерной модели. Результаты представлены на рисунке 7.

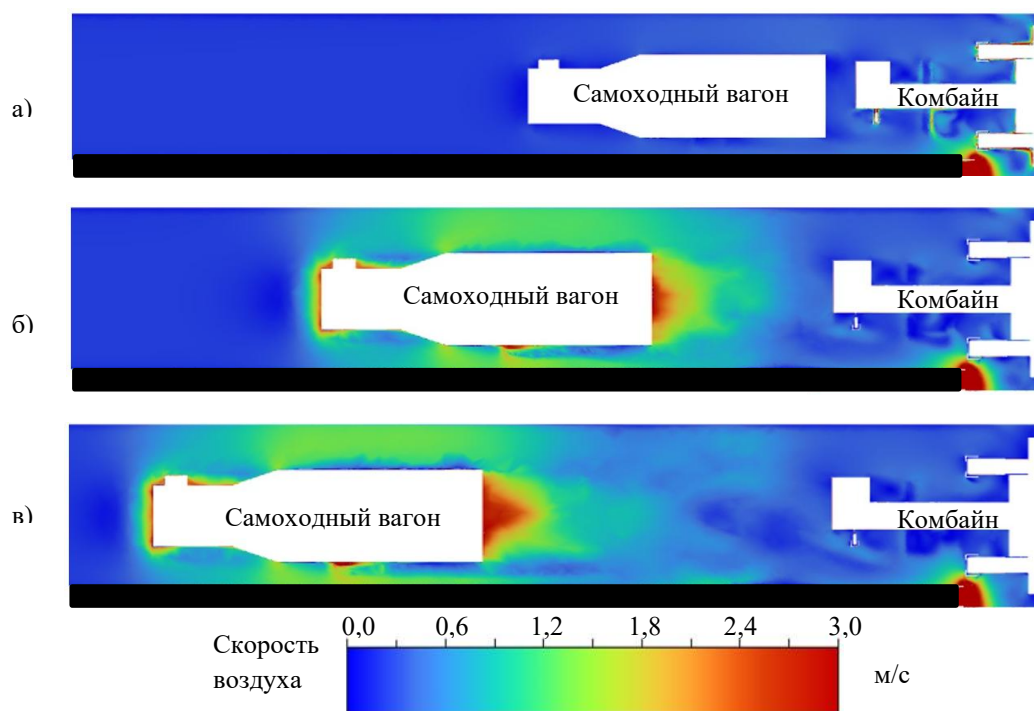


Рисунок 7 – Расчетные поля скорости воздуха в горизонтальном сечении исследуемой выработки, в разные моменты времени (всасывающий способ проветривания):
а) через 0 с; б) через 2 с; в) через 4 с

Полученные результаты показывают, что движение вагона локально изменяет структуру поля скоростей вблизи объекта движения. Однако существенного перераспределения теплового поля в условиях всасывающего способа проветривания в призабойном пространстве не наблюдается. Таким образом, влияние самоходного вагона носит преимущественно аэродинамический характер и не является определяющим фактором формирования температурного режима. Основным источником нагрева воздуха остаётся добычный комбайн.

Согласно результатам моделирования использование всасывающего способа проветривания тупиковой выработки является частью комплексного решения, которое позволяет обеспечить вентиляцию призабойного пространства и при этом эффективно управлять температурным режимом.

III научное положение:

Система управления тепловым режимом на рабочем месте машиниста комбайна, включающая организацию локальной подачи и направленного распределения охлажденного воздуха, обеспечивает нормализацию микроклиматических параметров в ограниченном объеме призабойного пространства.

Обеспечение допустимых температурных параметров в призабойном пространстве возможно путем разработки систем кондиционирования воздуха на рабочем месте машиниста комбайна. Проектирование таких систем основывается на комплексном подходе, включающем анализ тепловых процессов, формирующих микроклимат, моделирование распределения температур и скоростей воздуха, а также разработку технологической схемы организации системы охлаждения.

На рисунке 8 представлена блок-схема, описывающая методологические основы разработки системы кондиционирования воздуха на рабочем месте машиниста комбайна. Представленная схема отражает последовательность этапов, выполняемых при разработке системы кондиционирования от стадии выбора способа охлаждения до стадии проведения опытных испытаний разработанного оборудования и оценки эффективности предлагаемых решений.

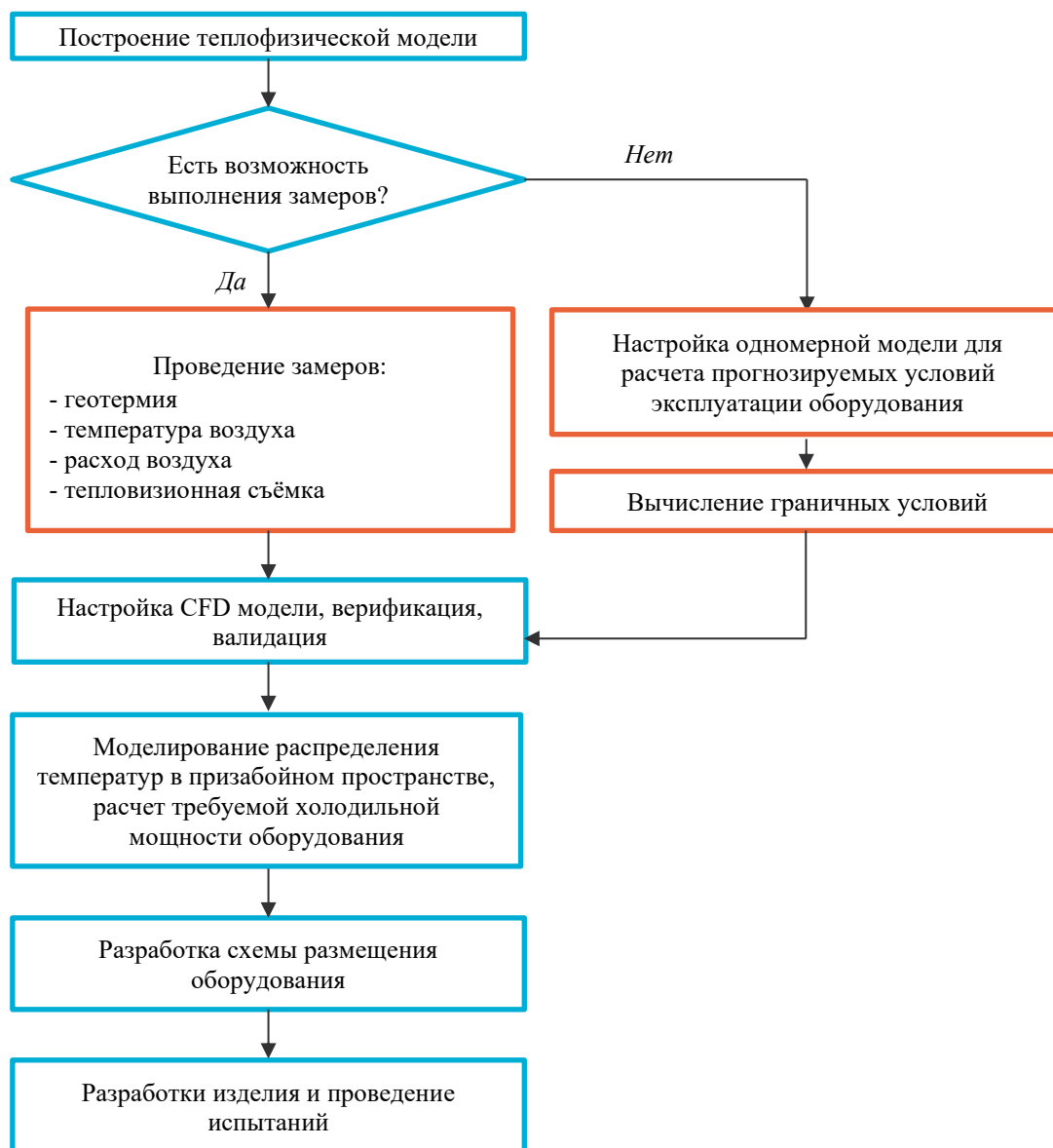


Рисунок 8 – Блок-схема для разработки системы локального кондиционирования призабойного пространства

Принятая к разработке система кондиционирования, основанная на принципе парокомпрессионного охлаждения, должна включать в себя следующие элементы:

- холодильная машина;
- трасса для транспортировки хладагента;
- воздухоохладительная установка;
- дефлекторы для подачи охлажденного воздуха на рабочее пространство;
- вентилятор местного проветривания с вентиляционным трубопроводом.

Описанные элементы в совокупности представляют собой систему кондиционирования воздуха (в дальнейшем СКВ). На рисунке 9 представлен концепт разрабатываемой СКВ.

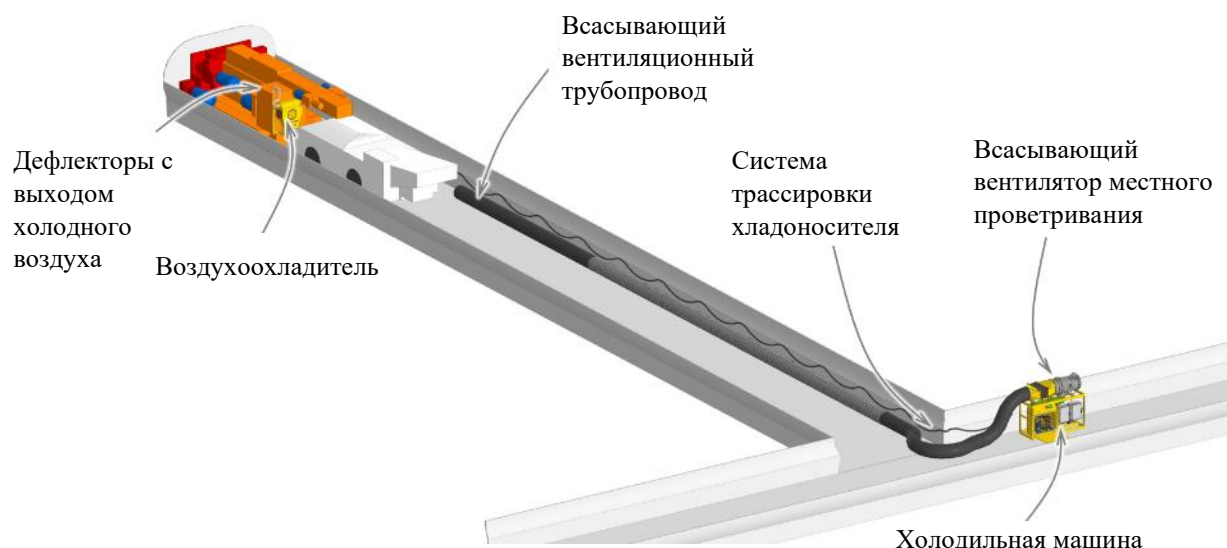


Рисунок 9 – Концепт системы кондиционирования воздуха (СКВ)

Предлагаемая система работает по принципу замкнутого цикла в комплексе с системой вентиляции, основанной на всасывающем способе проветривания. На рисунке 10 представлена область, которую необходимо охладить при решении задач данного исследования – это внутренняя часть кабины и прикабинное пространство. Границы рассматриваемого участка выделены красным цветом. При этом внешняя часть границы проходит по контуру тупиковой выработки.

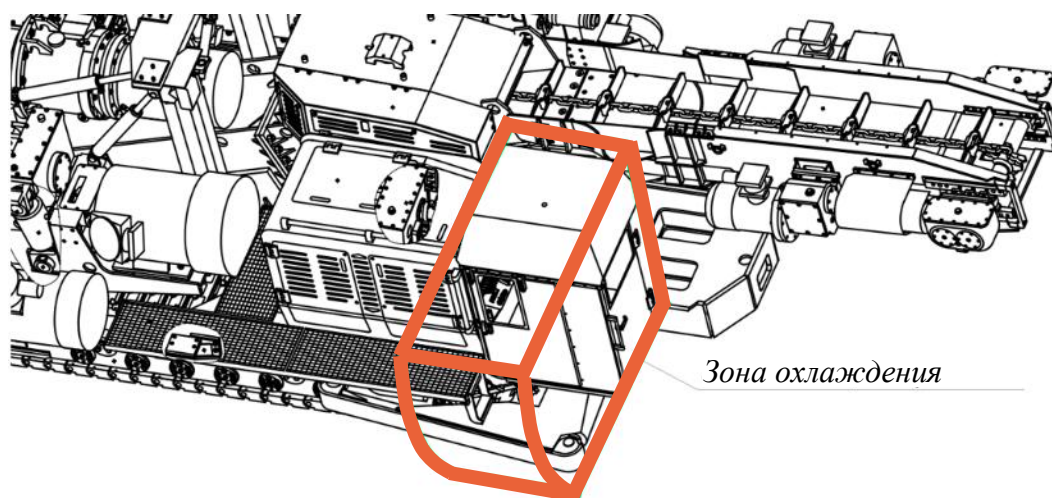
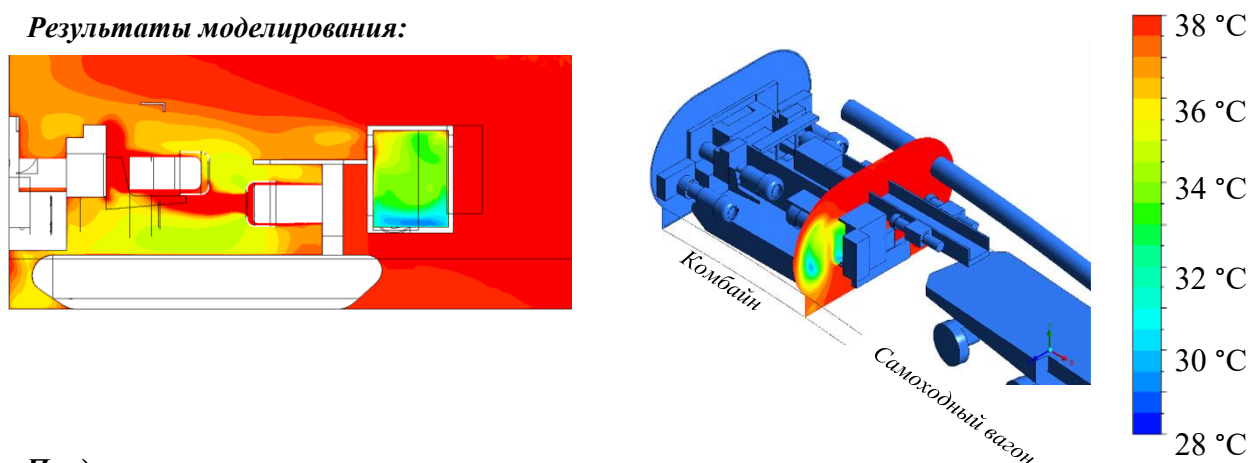


Рисунок 10 – Область, подлежащая локальному охлаждению (внутренняя часть кабины и прикабинное пространство) в условиях тупиковой комбайновой выработки

Согласно СанПиН 2.2.4.3359-16 безопасным перепадом температур для осуществления горнорабочими своей деятельности является величина равная 6°C , при этом скорость движения воздуха на рабочем месте не должна превышать $0,5\text{ м/с}$. Также в работе учитываются требования установленные обоснованием безопасности в части превышения температур использующегося на Гремячинском ГОК, где установлено, что максимально допустимая температура может равняться 36°C . Задачей данного этапа исследования является определение оптимальных условий подачи охлажденного воздуха на рабочее место машиниста комбайна, в условиях всасывающего способа проветривания. Анализ полученных

результатов моделирования показал, что оптимальным вариантом размещения дефлекторов с подачей охлажденного воздуха в прикабинном пространстве является их размещение сбоку на кабине и с направлением воздуха перпендикулярно дверному проему в сторону стенки выработки. При этом внутри кабины наилучший результат дает размещение ближе к дальней стенке относительно дверного проема. Выбранный вариант размещения дефлекторов и результаты расчета в трехмерной постановке задачи представлены на рисунке 11.

Результаты моделирования:



Предлагаемое расположение дефлекторов:

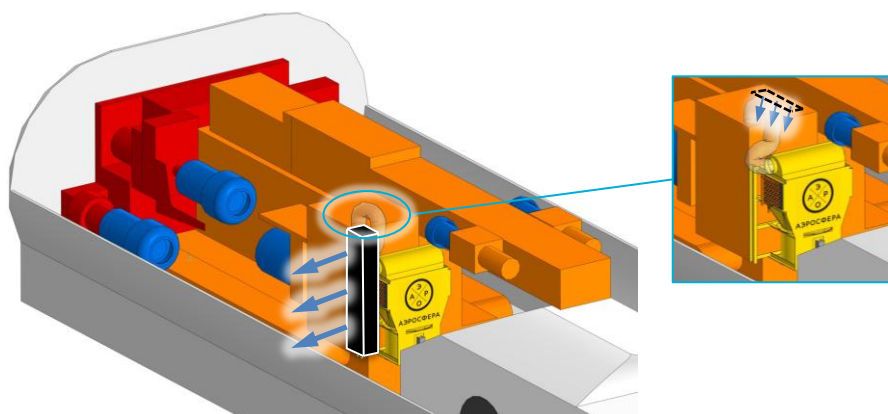


Рисунок 11 – Распределение температур внутри кабины комбайна и в прикабинном пространстве при всасывающем способе проветривания и подаче охлажденного воздуха в направлении к стенке выработки

Рассчитанная величина минимальной требуемой холодильной мощности воздухоохладителя составила 5 кВт, с учетом технологического запаса.

В рамках практической реализации научно-исследовательской работы на базе НПО «Аэросфера» выполнена разработка опытной холодильной машины КШв-15. Установка предназначена для обеспечения работы системы кондиционирования с хладопроизводительностью не менее 15 кВт. Общий вид готового изделия представлен на рисунке 12.

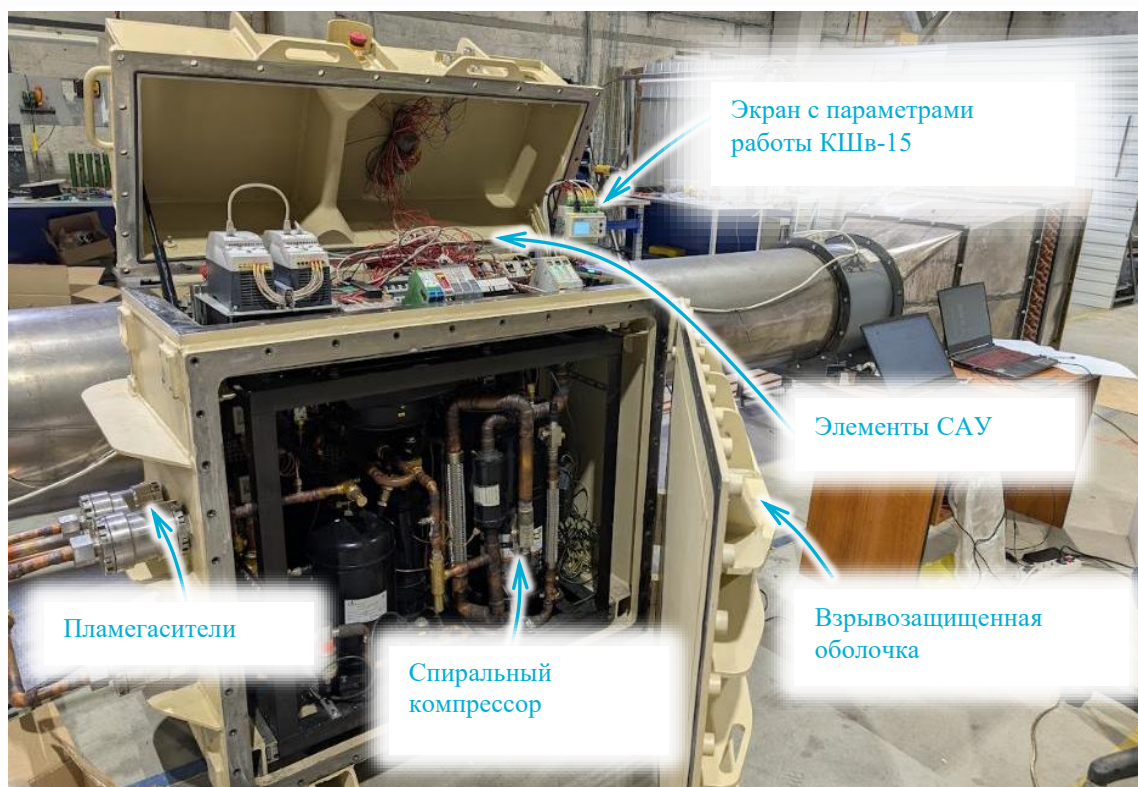


Рисунок 12 – Общий вид холодильной машины КШВ-15 производства НПО «Аэросфера»

С целью подтверждения проектных характеристик холодильной машины, которая в последующем станет частью системы СКВ-8, выполнены заводские испытания оборудования.

Для испытаний разработан специальный стенд, который состоит из двух контуров: воздушного и фреонового. Воздушный контур включает в себя блок конденсатора и блок испарителя, с некоторым расстоянием между ними. Теплый нагретый воздух из блока конденсатора подмешиваясь с нагретым воздухом из электрического калорифера поступает в блок испарителя, создавая тем самым перепад температуры на теплообменнике испарителя. В каждом из описанных блоков есть свой канальный вентилятор, обеспечивающий транспортировку воздуха через теплообменники. Фреоновый контур соединяет холодильную машину КШВ-15 с испарителем и конденсатором посредством фреоновых магистралей. Стенд оснащен системой датчиков, обеспечивающих функционирование системы автоматического управления и возможность непрерывного мониторинга параметров холодильного цикла. Данные с датчиков поступают в контроллер системы управления который осуществляет сбор и визуализацию данных, а также управление режимами работы спирального компрессора вентиляторов и регулируемых клапанов. Схема испытательного стенда представлена на рисунке 13. Конструкция стенда позволяет выполнять комплексные исследования в части подтверждения тепловых характеристик установки при разных режимах работы и имитируя при этом разные условия ее эксплуатации.

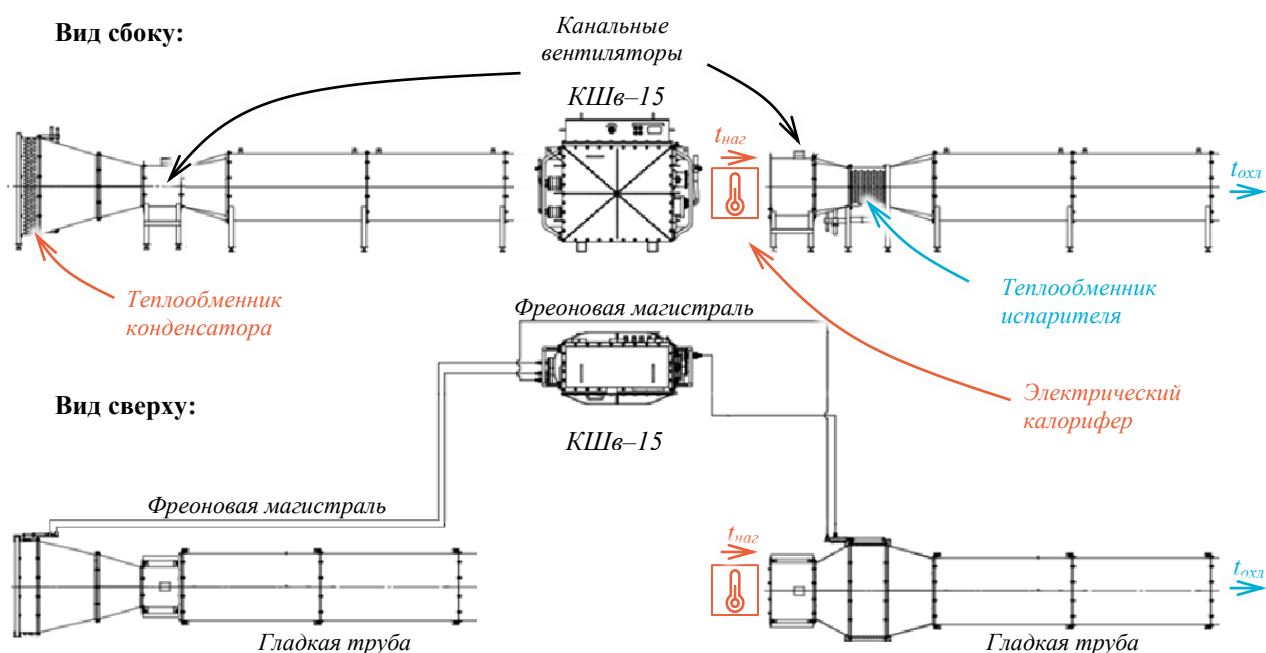


Рисунок 13 – Испытательный стенд для холодильной машины КШв-15

Определение фактической холодопроизводительности холодильной машины КШв-15 осуществлялось на основе экспериментальных данных, полученных при стендовых испытаниях. Расчеты основывались на анализе термодинамического состояния воздушного потока с использованием $i-d$ диаграммы. Данный метод позволяет не только учитывать изменение температуры, но и изменение влагосодержания воздуха, что особенно важно учитывать при последующей эксплуатации оборудования в условиях калийного рудника.

Суть метода заключается в определении энтальпии воздуха на входе в воздухоохладитель и на выходе из него, в качестве которого в данном исследовании выступает испарительный блок. Разность энтальпий I_1 и I_2 соответствует количеству теплоты, отводимому от воздушного потока при проходе через теплообменник блока испарителя. Для выполнения расчетов также необходимо выполнить замеры количества воздуха, проходящего по трубопроводу блока испарителя и вычисления массового расхода G_v :

$$G_v = \rho \cdot V \cdot S, \quad (11)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ; V – скорость воздуха, м/с ; S – площадь трубопровода испарительного блока.

При этом плотность воздуха определяется по следующей формуле:

$$\rho = \frac{P}{287 \cdot T}, \quad (12)$$

где P – величина абсолютного давления воздуха в помещении, где расположено оборудование, Па; T – температура воздуха в помещении, К.

Таким образом, итогом описанной методики является определение фактической холодопроизводительности холодильной машины КШв-15:

$$N = \Delta I \cdot G_v, \text{ кВт.} \quad (13)$$

На рисунке 14 приведена i-d диаграмма с полученными результатами заводских испытаний оборудования. Точки, представленные на диаграмме, пронумерованы в соответствии с замераами и выделены одинаковыми цветами.

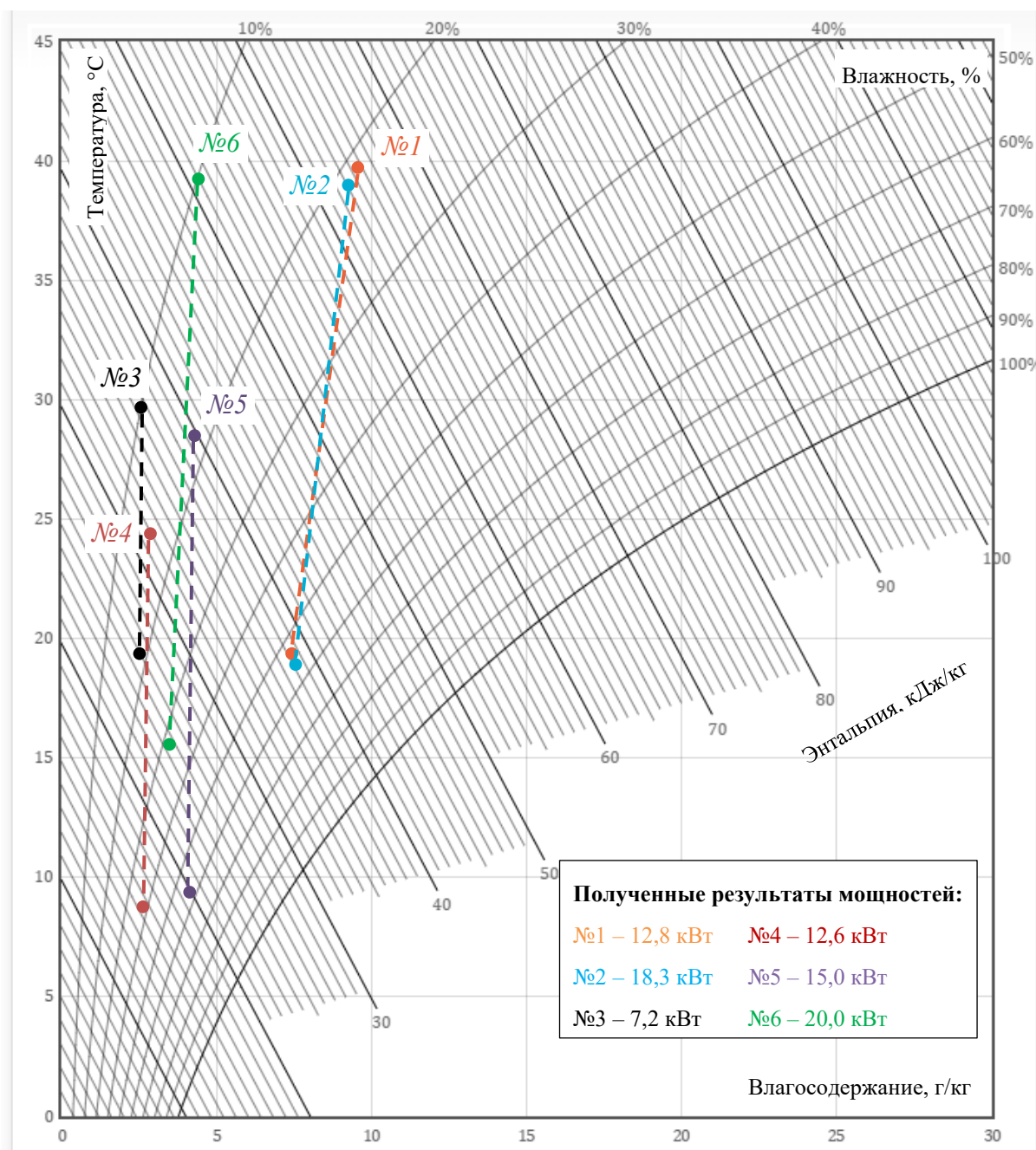


Рисунок 14 – Пример определения разности энтальпий на i-d диаграмме

Анализ полученных результатов на i-d диаграмме показал, что процесс охлаждения происходит либо без выделения влаги, либо с минимальной величиной конденсации влаги на поверхности теплообменника. Замеры при испытании №5 показали, что холодильная машина способна выдавать проектную холодильную мощность без процесса конденсации на поверхности теплообменника. Таким образом, разработанная холодильная машина КШВ-15 соответствует требованиям, заложенным при ее проектировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена решению научно-прикладной задачи, направленной на обоснование способа управления тепловым режимом в рабочем пространстве машиниста добычного комбайна калийного рудника основанного на всасывающем способе проветривания. В результате проведенного исследования получены следующие научные результаты:

- Выполнены натурные исследования распределения температур и скоростей воздуха в призабойном пространстве тупиковых выработок. Замеры выполнялись в условиях работающего и неработающего проходческо-очистного комплекса, в состав которого входят добычной комбайн и самоходный вагон.
- Выполнен мониторинг изменения температуры в призабойном пространстве при разных способах проветривания тупиковой выработки, а также при разных технологических процессах. Получены зависимости влияния способа проветривания на температурный режим.
- Разработана синтезированная модель, реализующая сопряжение одномерной и трёхмерной постановок теплофизической задачи, обеспечивающая пространственный анализ распределения температур и скоростей воздуха с учётом внешних тепловых факторов.
- Проанализировано влияние источников тепловыделения от оборудования проходческо-очистного комплекса на формирование теплового режима тупиковой горной выработки.
- Разработаны технические решения, направленные на нормализацию температурного режима на рабочем месте машиниста проходческо-очистного комбайна, реализованные в виде системы локального кондиционирования воздуха СКВ-8.

**СПИСОК РАБОТ,
Опубликованных автором по теме диссертации**

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

- 1 Исаевич А.Г., Суханов А.Е., Желнин М.С., Поляков И.В. Оценка эффективности различных вариантов проветривания тупикового комбайнового забоя по пылевому фактору в условиях глубокого калийного рудника // Горный журнал. - 2023. - №. 11. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.07.
- 2 Левин Л. Ю., Суханов А. Е., Исаевич А. Г., Козунин И. И. Экспериментальные исследования зависимости пылевой обстановки в тупиковой выработке от применяемого способа проветривания при механизированной добыче калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 10. – С. 35–50. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_35.
- 3 Левин Л. Ю., Суханов А. Е., Мальцев С. В. Определение безопасных параметров системы вентиляции тупиковых калийных выработок при всасывающем способе проветривания по фактору взрывоопасных газов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9. – С. 117–134. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_117.
- 4 Левин Л.Ю., Суханов А.Е., Мальцев С.В., Бартоломей М.Л., Пантелеев И.А. Исследование тепловых процессов в атмосфере рабочего пространства машиниста комбайна на глубоком калийном руднике при местном кондиционировании воздуха // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. –2026. – Т. 337. – № 2. – С. 38–49. DOI 10.18799/24131830/2026/2/4881
- 5 Смирнов А. Э., Суханов А. Е., Мальцев С. В. Исследование аэродинамического сопротивления вентиляционных трубопроводов при их эксплуатации в условиях калийных рудников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 4. – С. 622-632. – EDN HBCWZN.
- 6 Суханов А.Е., Шишлянников Д.И., Исаевич А.Г. Использование перекрестной схемы резания для снижения пылевидных и небогатых фракции при механизированной добыче калийной руды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 60-69. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3767.
- 7 Шишлянников Д. И., Трифанов М. Г., Муравский А. К., Микрюков А. Ю., Суханов А. Е. Повышение эффективности работы проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд на основе информации о нагруженности их приводов // Известия вузов. Горный журнал - 2021. - № 3. - С. 97-105. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-97-105.

Публикации в других изданиях:

- 8 Levin L., Semin M., Maltsev S., Luzin R., Sukhanov A. Numerical Analysis of the Impact of Variable Borer Miner Operating Modes on the Microclimate in Potash Mine Working Areas // Computation. – 2025. – Vol. 13, iss. 4. – Art. 85. – DOI: 10.3390/computation13040085.

- 9 Semin M., Ivantsov A., Lyubimova T., Isaevich A., Sukhanov A., Analyzing the impact of heat emissions from the borer miner on the efficiency of the exhaust ventilation system in a blind heading // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Т. 235. – С. 126183.
- 10 Sukhanov A., Maltsev S., Semin M., Isaevich A., Starikov A., Optimization of the Combined Ventilation System for Dust Reduction in Blind Headings of Potash Mines // Mathematical Modelling of Engineering Problems. – 2024. – Vol. 11, No. 5. – P. 1236-1244. – DOI 10.18280/mmep.110512. – EDN JBPWEV.
- 11 Александрова, М. А., Исаевич А.Г., Суханов А.Е. Обобщение исследований способов проветривания тупиковой выработки калийного рудника по пылевому фактору // Горное эхо. – 2024. – № 3(96). – С. 51-57. – DOI 10.7242/echo.2024.3.9. – EDN GBFULP.
- 12 Суханов А. Е., Мальцев С. В. Снижение уровня запыленности в тупиковой комбайновой выработке калийного рудника путем внедрения комбинированного способа проветривания // Горное эхо. – 2024. – №. 3 (96). – С. 84-91. DOI: 10.7242/echo.2024.3.14.
- 13 Суханов, А. Е. Разработка способа снижения запыленности тупиковых горных выработок калийных рудников / А. Е. Суханов // Актуальные проблемы недропользования : тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 21–27 мая 2023 года / Санкт-Петербургский горный университет. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – С. 218-220. – EDN SDHTSG.

Сдано в печать _____ 2026 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А