

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

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук  
Левин Лев Юрьевич

Пермь 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА .....	10
1.1 Существующие требования к нормированию микроклиматических условий .....	11
1.1.1 Нормирование теплового режима на территории Российской Федерации.....	12
1.1.2 Нормирование теплового режима в зарубежных странах.....	15
1.2 Анализ факторов, усложняющих ведение горных работ на глубоких подземных рудниках.....	16
1.3 Анализ возможных источников тепловыделения в тупиковой выработке и способы управления тепловыми процессами в тупиковых выработках .....	20
1.4 Анализ существующих подходов к моделированию распределения тепла в горных выработках .....	25
1.5 Цели и задачи исследования.....	27
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В УСЛОВИЯХ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК ГРЕМЯЧИНСКОГО ГОК .....	28
2.1 Оценка влияния породного массива на формирование температуры в тупиковых выработках .....	30
2.2 Анализ факторов формирования теплового режима в тупиковых выработках.....	33
2.3 Оценка влияния способа проветривания на температуру в тупиковых выработках.....	43
Выводы по главе .....	46
3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБСТАНОВКИ В ПРИЗАБОЙНОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....	47
3.1 Одномерная постановка задачи.....	48
3.2 Трехмерная стационарная постановка задачи .....	54
3.2.1 Разработка геометрии модели .....	55
3.2.2 Математическая постановка задачи и определение граничных условий .....	56
3.2.3 Исследование сеточной сходимости .....	61
3.2.4 Валидация разработанной модели .....	64
3.2.5 Выполнение расчетов при нагнетательном способе проветривания.....	69
3.3 Трехмерная нестационарная постановка задачи .....	70
3.3.1 Корректировка модели под расчеты нестационарных процессов .....	71
3.3.2 Оценочные расчеты при нестационарной постановке задачи .....	72
Выводы по разделу .....	76

4	ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В ПРИЗАБОЙНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В УСЛОВИЯХ ВСАСЫВАЮЩЕГО СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ .....	78
4.1	Обоснование всасывающего способа проветривания.....	78
4.2	Моделирование распределения температур при локальном охлаждении воздуха на основе всасывающего способа проветривания.....	86
4.3	Сравнительный анализ предлагаемой системы в условиях нагнетательного и комбинированного способов проветривания тупиковой выработки .....	97
	Выводы по разделу .....	103
5	РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ МАШИНИСТА КОМБАЙНА .....	105
5.1	Методологические основы разработки системы локального охлаждения воздуха в тупиковой комбайновой выработке .....	105
5.1.1	Анализ способов охлаждения рудничного воздуха для разработки системы местного кондиционирования .....	107
5.1.2	Построение модели распределения температур в призабойном пространстве .....	108
5.1.3	Разработка концепции системы местного кондиционирования .....	109
5.2	Практическая реализация системы местного кондиционирования и ее заводские испытания, описание условий проведения испытаний .....	114
5.3	Выводы по разделу .....	127
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	129
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130

## ВВЕДЕНИЕ

### 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. Для поддержания мощностей предприятия используется все более высокопроизводительное добычное оборудование. Работа такого оборудования характеризуется высокими энергозатратами, высоким уровнем запыленности, шума и вибраций, а также необходимостью поддержания эффективности вспомогательных процессов, влияющих на его работу. Описанные факторы зачастую ограничивают возможности увеличения производительности подземных рудников.

В то же время, в условиях увеличения глубины отработки калийных месторождений возрастает значимость обеспечения требуемых параметров теплового режима. В связи с этим 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, которая в ходе эксплуатации посредством теплопередачи нагревает весь воздух рудничной атмосферы. Работа высокопроизводительного оборудования также оказывает негативное влияние на тепловую обстановку. Фиксируемые температуры воздуха на глубоких калийных рудниках достигают величины 39°C, при допустимой требованиями Федеральных норм и правил (ФНиП) [54] величине 26°C. В ближайшей перспективе по мере увеличения глубины отработки и отдаления рабочих зон относительно стволов ситуация будет усугубляться. В связи с этим актуальной является задача по разработке научно-технических решений, направленных на снижение температуры воздуха в рабочих зонах глубоких калийных рудников.

Ведение горных работ в условиях высоких температур негативно сказывается на здоровье горнорабочих. Увеличивается риск профессиональных заболеваний и аварий, а также происходит снижение эффективности труда, увеличиваются затраты на поддержание здоровья сотрудников [1,38]. Стоит отметить, что отработка калийно-

магниевого месторождений осуществляется при помощи проходческо-очистных комбайновых комплексов. Эффективность и надежность такого оборудования в условиях высоких температур значительно снижается, так как происходят частые перегревы приводов и снижается эффективность смазочных материалов [63].

Вопросы нормализации теплового режима в подземных горных выработках рассмотрены в исследованиях таких ученых как Щербань А.Н., Медведев Б.И., Воропаев А.Ф., Дядькин Ю.Д., Смирнов Ю.М., Гендлер С.Г., Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Файнбург Г.З., Бородавкин Д.А., Ольховский Д.В., Кобылкин С.С., M.J. McPherson, K.L. Gibson, S.J., Bluhm, L. Maska и др. Но ограниченные ранее возможности вычислительной техники привели к развитию приближенных методов расчета теплового режима. Существующие же современные подходы к проведению научных исследований позволяют использовать средства трехмерного моделирования в стационарной и нестационарной постановках задач, с помощью которых появляется возможность решать задачи, направленные на нормализацию микроклимата. Разработка решений в части управления тепловым режимом позволят вовлекать в отработку глубокие запасы, используя при этом самое современное высокопроизводительное горное оборудование.

### **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 [54] 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.).

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора состоял в постановке цели исследовательской работы и ее задач, выполнении натуральных исследований, представленных в данной работе, выборе методики исследования, обработке и анализе полученных результатов, участии в разработке математических моделей и их верификации, проведении заводских испытаний опытного оборудования.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, чл.-кор. РАН, д.т.н. Левину Л.Ю. за ценные рекомендации, постоянное внимание, поддержку и помощь в формировании научного направления и выполнении диссертационного исследования, д.т.н. Семину М.А., д.ф.-м.н. Пантелееву И.А., Бублику С.А., Лузину Р.Д., за помощь в разработке математических моделей и их программной реализации, к.т.н. Мальцеву С.В. за ценные указания и создание уникальных условий для исследований, д.т.н. Зайцеву А.В. и к.т.н. Ольховскому Д.В. за консультации в области теплофизики.

Проведение экспериментальной и опытно-испытательной части исследования были бы невозможны без содействия ведущих специалистов предприятия ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий»: заместителя главного инженера Раздорова С.А., главного инженера Томилина П.А., а также руководства «НПО «Аэросфера».

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

### **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.

## 1 АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА

Калийные удобрения играют большую роль в жизни современного человечества. В первую очередь это связано с тем, что калий благоприятно влияет на процессы питания сельскохозяйственных культур, посредством чего обеспечивается высокая урожайность.

Основной источник калийных минеральных удобрений – подземные рудники, преимущественно расположенные в Российской Федерации, Республике Беларусь и Канаде. Согласно источнику [12] на три указанные государства приходится 80 % добычи калийной руды, из которой в дальнейшем изготавливают удобрения. В настоящие дни на территории РФ и стран СНГ активно разрабатываются три месторождения: Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, Старобинское месторождение и Гремячинское месторождение [68].

Не снижается также тенденция освоения новых участков залежей калийных солей. Согласно рисунку 1.1 множество залежей в настоящее время находится в стадии подготовки к разведке, что свидетельствует о дальнейшем росте производства калийных удобрений.



Рисунок 1.1 - Распределение запасов калийных солей между субъектами Российской Федерации (млн т KCl) и их основные месторождения

Текущие тенденции свидетельствуют о том, что предприятия по добыче хлористого калия будут наращивать мощности и вовлекать в работу новые запасы, в том

числе, обрабатывать глубокие залежи. Уже в настоящее время освоение Гремячинского месторождения осуществляется на глубине 1200 м, а глубины ведения горных работ на Старобинском месторождении превышают 800 м.

Глубина ведения горных работ привносит свои нюансы при разработке месторождений. Горная отрасль сталкивается с задачами, которые ранее не исследовались. Одной из таких задач является нормализация температурного режима, поскольку с глубиной залегания полезных ископаемых происходит рост температуры массива и, как следствие, ухудшение микроклиматических условий на рабочих местах шахтеров.

Работа в условиях высоких температур негативно сказывается на здоровье горнорабочих. Повышенная температура воздуха в забоях может привести к перегреву организма, тепловому удару, ухудшению самочувствия и снижению работоспособности [119,111]. Это может вызвать усталость, повышение частоты пульса и температуры тела, а также снижение производительности труда. Высокие температуры оказывают значительное влияние и на работу горно-шахтного оборудования. Результатом подобного влияния может быть перегрев приводов, ухудшение свойств смазочных материалов и деформация электрокабелей, а также гидравлических шлангов.

### **1.1 Существующие требования к нормированию микроклиматических условий**

Микроклимат производственных пространств определяется как совокупность физических факторов производственной среды: температура, влажность, подвижность воздуха и тепловое излучение от поверхностей [31,67]. Поскольку данная работа рассматривает ситуации с высокими температурами окружающей среды, то в дальнейшем речь пойдет о существующих способах нормирования микроклиматических параметров в ситуациях превышения допустимых температур.

Одним из главных условий нормальной жизнедеятельности человека является отведение выделяемой организмом теплоты в окружающую среду. Нарушение теплового баланса может привести к перегреву, в результате чего возможно снижение трудоспособности или полная ее потеря. У горнорабочих снижается внимание и концентрация на выполняемых технологических процессах, в результате чего увеличивается вероятность возникновения несчастных случаев и травм. В итоге при перегреве организма возможны потеря сознания и даже летальные исходы [67,87].

В связи со значительным влиянием микроклимата на здоровье горнорабочих появляется необходимость формулирования определенных требований к его параметрам

и последующему их нормированию. В [8] определены следующие понятия, характеризующие микроклимат на рабочих местах и в помещении:

1. Допустимые параметры микроклимата – это сочетание количественных показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать преходящие и быстро нормализующиеся изменения теплового состояния организма, сопровождающиеся напряжением механизмов терморегуляции, не выходящим за пределы физиологических приспособительных возможностей. При этом не возникает повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут наблюдаться дискомфортные тепловые ощущения, ухудшения самочувствия и понижение работоспособности.
2. Оптимальные параметры микроклимата – это сочетания количественных показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального теплового состояния организма без напряжения механизмов терморегуляции. Они обеспечивают ощущение теплового комфорта и создают предпосылки для высокого уровня работоспособности.

В соответствии с приведенными терминами достижение на рабочем месте оптимальных параметров микроклимата в условиях подземных горных выработок представляется крайне затруднительным. Более того, обеспечение даже допустимых микроклиматических параметров зачастую сопряжено со значительными техническими ограничениями. В связи с этим задача управления факторами, формирующими микроклимат на рабочих местах машинистов, является актуальной и требует современных подходов к ее решению.

### **1.1.1 Нормирование теплового режима на территории Российской Федерации**

В настоящее время на территории Российской Федерации микроклимат в рабочих зонах в подземных горных выработках регламентируется следующими федеральными нормами и правилами:

1. Для горных предприятий, за исключением угольных и нефтяных шахт - Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых (Приказ Ростехнадзора № 505 от 8.12.2020) [54].

Требования документа: *п. 152 - Температура воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок и на рабочих местах с постоянным присутствием персонала не должна превышать +26 °С.*

2. Для нефтяных шахт - Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности (Приказ Ростехнадзора № 534 от 15.12.2020) [52].

Требования документа: п. 1746 - Температура воздуха в добычных, подготовительных и других действующих выработках у мест, где работают люди, не должна превышать 26°C при относительной влажности до 90% и 25°C - при относительной влажности свыше 90%; п. 1747 - В горных выработках, в которых проводятся закачка теплоносителя в пласт, отбор продукции добывающих скважин, проложены трубопроводы с температурой наружной поверхности 40°C и выше (далее - "горячие" трубопроводы), а также в емкостях нефтеловушек допускается температура рудничной атмосферы до 36°C включительно при условии, что в этих горных выработках люди не находятся постоянно в течение рабочей смены.

3. Для угольных шахт - Правила безопасности в угольных шахтах (Приказ Ростехнадзора № 507 от 8.12.2020) [53].

Требования документа: п. 121 - Проветривание горных выработок осуществляют таким образом, чтобы все действующие горные выработки были обеспечены расходом воздуха не менее расчетного, а состав, скорость и температура воздуха в них соответствовали настоящим Правилам безопасности. Расход, состав, скорость и температура воздуха в горных выработках должны быть определены в документации на ведение горных работ.

Также стоит отметить, что микроклиматические параметры на рабочих местах производственных объектов, в том числе и в горных выработках, регламентируются СанПиН 2.2.4.3359-16 "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах" [59]. Согласно данному документу, оптимальные параметры микроклимата варьируются в зависимости от категории работ по уровню энергозатрат. Оптимальные значения представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Оптимальные величины параметров микроклимата на рабочих местах производственных помещений в теплый период года

Период года	Категория работ по энергозатратам	Температура воздуха	Температура поверхности	Относительная влажность	Скорости движения воздуха не более
Теплый	Ia (<139)	23–25 °C	22–26 °C	60 – 40 %	0,1 м/с
	Iб (140–174)	22–24 °C	21–25 °C		0,1 м/с
	IIa (175–232)	20–22 °C	19–23 °C		0,2 м/с
	IIб (233–290)	19–21 °C	18–22 °C		0,2 м/с
	III (> 290)	18–20 °C	17–21 °C		0,3 м/с

Данным документом регламентируются и допустимые температуры воздуха на рабочих местах, которые также разделены согласно категориям работ по энергозатратам. Допустимые величины представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 — Допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах производственных помещений в теплый период года

Период года	Категория работ по энергозатратам	Температура воздуха для диапазона ниже оптимальных величин	Температура воздуха для диапазона выше оптимальных величин	Относительная влажность	Скорости движения воздуха не более
Теплый	Ia (<139)	21,0–22,9 °С	25,1–28,0 °С	15 – 75 %	0,2 м/с
	Iб (140–174)	20,0–21,9 °С	24,1–28,0 °С		0,3 м/с
	IIa (175–232)	18,0–19,9 °С	22,1–27,0 °С		0,4 м/с
	IIб (233–290)	16,0–18,9 °С	21,1–27,0 °С		0,5 м/с
	III (> 290)	15,0–17,9 °С	20,1–26,0 °С		0,5 м/с

Согласно категоричности работ по параметру «энергозатрат», описанной в СанПиН 1.2.3685-21 [58], а также согласно исследованиями [17,15] работы, осуществляемые в подземных горных выработках, относятся к III категории. Анализируя требования, описанные в таблицах 1.1 и 1.2, можно сделать вывод, что максимальная допустимая температура на рабочих местах в подземных горных выработках 26 °С, а оптимальная величина температуры составляет 20 °С.

В исследованиях Зайцева А.В. и Бородавкина Д.А. [17, 15, 4] глубоко проработан вопрос важности комплексной оценки влияния микроклиматических параметров на безопасную и эффективную трудовую деятельность горнорабочих в подземных рудниках. Согласно данным исследованиям более корректным подходом при оценке условий является оценка индекса тепловой нагрузки - «ТНС-индекс», порядок определения которого установлен методическим документом [46]. Данный параметр характеризует сочетанное действие на организм параметров микроклимата (температуры, влажности, скорости движения воздуха, теплового облучения) и выражается одночисловым показателем в °С [59].

В таблице 1.3 представлены значения допустимых величин индекса тепловой нагрузки для рабочих мест шахтеров.

Таблица 1.3 —Определение класса условий труда по фактору микроклимата в зависимости от значения ТНС-индекса

Класс условий труда					
Допустимый	Вредный				Опасный
	3.1	3.2	3.3	3.4	
23,9 °С	24,2 °С	25,0 °С	26,4 °С	29,1 °С	>29,1 °С

Согласно исследованию [15] класс условий труда у горнорабочих глубокого подземного калийного рудника является вредным, а не опасным. В связи с этим для исследуемого рудника был разработан внутренний регламентирующий документ – обоснование безопасности опасного производственного объекта (ОБ ОПО), отступление от требований промышленной безопасности в части превышения температуры воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок, а также на рабочих местах с постоянным присутствием персонала. Согласно разработанному документу максимально допустимой является температура, равная 36 °С при влажности рудничного воздуха не более 30%. При совокупности таких параметров величина ТНС-индекса составляет 27,9 °С, что, согласно таблице 1.3, не относится к опасной категории для горнорабочих.

Поскольку для исследуемого в данной диссертационной работе подземного рудника разработаны требования в части увеличения допустимых температур, то справедливым является руководствоваться не требованиями ФНиП [54], а именно величинами, описанными в ОБ ОПО. Разработанный для рудника документ получил положительное одобрение при прохождении экспертизы промышленной безопасности и внесен в реестр заключений экспертизы промышленной безопасности.

### 1.1.2 Нормирование теплового режима в зарубежных странах

Освоение глубоких месторождений – общемировая тенденция. В связи с этим в каждой стране, где ведутся горные работы на больших глубинах, имеются свои требования к температурному режиму на рабочих местах.

Ближайшей страной, обрабатывающей глубокие месторождения, является Республика Беларусь, где в разработке находится Старобинское месторождение калийных солей. Редакция правил безопасности, которая действовала до 01.06.2024 года, гласила: *«Температура воздуха в подготовительных, очистных и других действующих выработках не должна превышать +26°С. При температуре свыше +26°С должны приниматься меры по ее снижению или улучшению микроклимата на рабочих местах»*. В текущей редакции правил безопасности [55] данный пункт утратил силу, но появилось

требование, согласно которому необходимо контролировать температуру воздуха в горных выработках, где температура превышает значение 26°C. Данных требований по температурному режиму недостаточно для организации безопасных условий труда горнорабочих. Решение этой проблематики описано в исследовательской работе [4].

Требования национального института охраны труда и здоровья в США (NIOSH) [109] регламентируют, что температура влажного термометра не должна превышать 28°C. При этом Американская ассоциация государственных промышленных гигиенистов ACGIH разработала пороговые значения согласно данным, представленным в таблице 1.4 [124].

Таблица 1.4 — Допустимая температура термометра с черным шаром в зависимости от степени тяжести труда

Схема работы	Ограничения по температуре		
	Легкая работа	Умеренная работа	Тяжелая работа
Непрерывная работа	30,0°C	26,7°C	25,0°C
75% работ и 25% отдыха каждый час	30,6°C	28,0°C	25,9°C
50% работ и 50% отдыха каждый час	31,4°C	29,4°C	27,9°C
25% работ и 75% отдыха каждый час	32,2°C	31,1°C	30,0°C

Согласно исследованию [125] во многих странах установлены требования по параметру Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) при разработке глубоких залежей. В Австралии данный параметр на рабочих местах подземных рудников не должен превышать 28 °C для тяжелых работ и 30 °C для работ средней тяжести. При этом обязательным условием является назначение периодов отдыха. В случае превышения данных мер необходима разработка решений по искусственному охлаждению. На горнодобывающих предприятиях Южной Африки установлены другие требования к тепловому режиму. Критическим значением Wet-Bulb Globe Temperature считается 30 °C. При значениях свыше указанной величины необходимо задействовать системы кондиционирования и нормировать рабочий день шахтеров.

## 1.2 Анализ факторов, усложняющих ведение горных работ на глубоких подземных рудниках

Строительство подготовительных выработок и добыча полезного ископаемого на всех калийных рудниках Российской Федерации осуществляется короткими забоями с применением проходческо-очистных комплексов. Аналогичный способ ведения работ

применяется при строительстве подготовительных выработок на рудниках Старобинского месторождения (Республика Беларусь). Объектом исследования настоящей диссертационной работы является тупиковая выработка подземного калийного рудника с размещённым в ней проходческо-очистным комплексом, что обуславливает применимость полученных результатов на ряде месторождений с большой глубиной залегания полезного ископаемого.

Для формирования объективной оценки аэрологических процессов необходимо выполнить анализ факторов, определяющих и усложняющих формирование параметров рудничной атмосферы в рассматриваемом объекте. Исследование выполнено на примере подземного рудника Гремячинского ГОК, осуществляющего отработку запасов одноименного месторождения калийных солей. Горные работы в данных условиях можно охарактеризовать тяжелыми по факторам «запыленность» и «температурный режим».

### **Пылевая обстановка в тупиковых выработках калийных рудников**

Разрушение породного массива высокопроизводительным оборудованием сопровождается пылеобразованием. Вопросам запыленности в тупиковых выработках подземных калийных рудников посвящены многие исследования, некоторые из которых представлены в источниках [40,48,65,22]. Основная их суть сводится к тому, что для нормализации пылевой обстановки на калийных рудниках предлагается использовать вентиляционные способы, основанные на модернизации и улучшении схем проветривания.

В исследованиях, выполненных под научным руководством Файнбурга Г.З. [70,72,73] рассмотрены решения по обеспыливанию призабойного пространства калийных рудников, основанные на всасывающем способе проветривания. В предлагаемом подходе свежая струя подается к призабойному пространству по выработке, а исходящий, загрязненный воздух удаляется в замкнутом объеме по вентиляционному трубопроводу. При этом важно, чтобы были обеспечены 2 условия: оптимальное отставание конца всасывающего трубопровода от щита комбайна и достаточный расход воздуха, обеспечивающий вынос пыли из призабойного пространства.

Одни из первых опытно-промышленных испытаний всасывающего способа проветривания проводились на калийных рудниках в 1988 – 1990 гг. [27]. Согласно представленным исследованиям, проветривание тупиковых выработок всасывающим способом имеет высокий потенциал в части увеличения объема удаления запыленного

воздуха из призабойного пространства. Но частым вопросом при внедрении описанных решений остается обоснование безопасности предлагаемого способа проветривания по газовому фактору.

Ввиду постепенного развития вычислительных комплексов появилась возможность детального трехмерного моделирования газовой обстановки в призабойном пространстве. Возможность использования всасывающего проветривания рассматривается как в зарубежной литературе [105,106,121], так и в отечественных работах. И в этом вопросе особое внимание стоит уделить исследованиям Исаевича А.Г. [20,35,65]. Перечень его работ посвящен изучению пылевой обстановки в условиях подземных выработок калийных рудников, в том числе рассматривается и Гремячинский ГОК. Перечень работ включает в себя большой спектр экспериментальных исследований. Установлено, что концентрация пыли в призабойном пространстве тупиковых комбайновых выработок может достигать величины 5500 мг/м<sup>3</sup>. Основными источниками запыленности являются следующие процессы [20,35,117,40,64]: перегрузка породы с грузчика комбайна на бункер-перегрузатель/самоходный вагон; погрузка отбитой руды с почвы выработки шнеками комбайна; разрушение горной породы исполнительными органами комбайна.

Одним из предлагаемых решений по нормализации пылевой обстановки в работах Исаевича А.Г. являлось, как и в более ранних исследованиях, внедрение всасывающего способа проветривания. В связи с тем, что требования ФНиП не позволяют использовать предлагаемые способы проветривания тупиковых выработок, для рудника Гремячинского ГОК был разработан документ – «Обоснование безопасности опасного производственного объекта в части изменения способа проветривания тупиковых выработок.» Этапы внедрения предлагаемых решений описаны в работах [21,65,118,35,66].

Предлагаемые способы проветривания обусловили формирование новых подходов к нормализации теплового режима в тупиковых выработках глубоких подземных калийных рудников, о которых пойдет речь в данной диссертационной работе.

### **Температурный режим в тупиковых выработках глубоких калийных рудников**

На сегодняшний день температуры воздуха в тупиковых выработках глубоких подземных рудников могут значительно превышать значения, которые установлены требованиями ФНиП [54]. Например, в выработках подземного рудника Гремячинского ГОК фиксируются температуры воздуха, равные 39-40 °С. В связи с чем

актуальным является вопрос по разработке мероприятий, направленных на нормализацию температурного режима.

В работах Зайцева А.В. и Левина Л.Ю. приведены разные подходы по управлению микроклиматическими параметрами в глубоких рудниках, в том числе и в калийных [18,14,17,33,32,34]. Основной подход к решению проблем, связанных с высокими температурами, заключался в применении теплотехнических методов, в том числе использовании систем кондиционирования [16]. По результатам исследований на предприятии ЕвроХим-ВолгаКалий были внедрены в нескольких экземплярах системы кондиционирования воздуха тупиковых выработок СКВ-180 и СКВ-250. В ходе испытаний был достигнут результат снижения температуры воздуха с +36 °С до +26 °С. Несмотря на достигнутый эффект предложенные решения имеют определенные недостатки. К основным стоит отнести высокие энергозатраты на работу оборудования, сложность перемонтажа оборудования и утилизация выделяемого тепла. Конструктивные особенности разработанных систем обуславливают значительные затраты времени на перемонтаж и транспортировку, вследствие чего их использование в условиях тупиковых комбайновых выработок оказалось затруднительным.

В исследованиях Ольховского Д.В. рассматривается задача, направленная на минимизацию тепловых потерь при транспортировке охлажденного воздуха по вентиляционному трубопроводу от системы кондиционирования до забоя [49]. При испытаниях СКВ было установлено, что доля тепловых потерь происходит в результате лучистого теплообмена, а величина этих потерь может достигать 77 %. В связи с чем предложены способы снижения нагрева транспортируемого воздуха путем изменения степени черноты используемых трубопроводов. Предлагается теплоизоляция вентиляционных трубопроводов, что помогает снизить тепловые потери. В то же время дополнительное теплоизоляция вентиляционных трубопроводов усложняет технологический процесс по перемонтажу оборудования и требует дополнительного контроля за его целостностью.

В исследованиях Бородавкина Д.А. [16,17] выполнен анализ действующей нормативно-методической базы в области регламентирования микроклиматических условий, измерение уровня энергозатрат горнорабочих и определение индексов тепловой нагрузки среды в теплый и холодный периоды времени года. На основании проделанной работы предложена система нормирования микроклиматических условий в горных выработках и для подземного рудника Гремячинского ГОК разработано обоснование безопасности опасного производственного объекта (ОБ ОПО) в части превышения температур воздуха. При соблюдении установленных организационных и

технических компенсирующих мероприятий максимальная допустимая величина температуры воздушной среды составляет 36 °С. Но существующие условия ведения горных работ не позволяют выдерживать вновь установленной допустимой температуры, что обуславливает необходимость разработки дополнительных технических решений по регулированию теплового режима.

Таким образом, нормализация температурного режима в тупиковых выработках в условиях глубоких калийных рудников является актуальной научно-исследовательской задачей, решение которой требует пересмотра существующих подходов и разработки новых решений с использованием ранее накопленного опыта.

### **1.3 Анализ возможных источников тепловыделения в тупиковой выработке и способы управления тепловыми процессами в тупиковых выработках**

Формирование микроклимата в подземных горных выработках обусловлено совокупным воздействием разных факторов. При подземной разработке месторождений на большой глубине существенный вклад в формирование микроклимата привносит температура окружающего массива [122]. Оценочный анализ изменения величины температуры нетронутого массива в зависимости от глубины ведения горных работ выполняется через параметр геотермического градиента [61]. С глубиной температура нетронутого массива увеличивается, в связи с этим значение геотермического градиента необходимо определять и актуализировать на начальных стадиях исследований, касающихся изучения и нормализации микроклиматической обстановки.

Эксплуатация добычных комбайнов и самоходных машин обуславливает локальное повышение температуры горных пород в приконтурной зоне по сравнению с температурой нетронутого массива. В исследованиях [4,51,3] рассмотрен процесс формирования теплового режима в длинной очистной лаве. Результаты экспериментальных исследований показали, что тепловой режим при данном способе отработки носит переменный характер. Выявлено, что основным накопителем теплоты в лаве является приконтурный породный массив, который после остановки работ способен передавать теплоту в рудничный воздух. В ходе исследований построена математическая модель, позволяющая принимать безопасные и эффективные решения по управлению теплом в лавах. Стоит отметить, что описанные исследования не рассматривают короткие очистные забои, которые характерны для камерной системы разработки и для проходческих работ. Энергоемкость агрегатов, применяющихся при проходке выработок короткими забоями, достигает сотни киловатт [75,57,56], что при ограниченном объеме воздуха может приводить к значимому росту окружающей температуры.

Величина тепловыделения от горных машин и вспомогательного оборудования зависит от конструктивных особенностей, суммарной электрической мощности (в некоторых случаях мощности двигателей внутреннего сгорания) и режима его работы. Исследования [106] гласят, что при работе горного оборудования часть потребляемой электрической энергии преобразуется в теплоту, которая в условиях ограниченного пространства горных выработок рассеивается в рудничную атмосферу. В работе [130] представлены результаты натурных исследований, подтверждающих, что эксплуатация оборудования, оснащенного двигателями внутреннего сгорания, на калийных и железорудных месторождениях также способна оказывать значительное влияние на температурный режим. Также рассмотрены и электрические машины, используемые при добыче полезных ископаемых. В качестве результатов предложены эмпирические формулы, позволяющие прогнозировать нагрев при эксплуатации добычных комбайнов, погрузочно-доставочных машин, конвейерного оборудования, вентилятора местного проветривания и т.д.

Наиболее эффективным решением задачи нормализации микроклимата является разработка способов, позволяющих управлять микроклиматическими параметрами. В первую очередь для эффективного охлаждения воздуха необходима правильная организация системы вентиляции на руднике, исключая возникновение рециркуляционных контуров вблизи рабочих зон. В некоторых исследованиях говорится, что способ охлаждения путем выноса нагретого воздуха из рабочей зоны может помочь снизить температуры воздуха [2]. В исследовании [114] также продемонстрирован способ снижения температуры путем правильной организации системы вентиляции в длинных очистных забоях. Однако даже при оптимально настроенной системе вентиляции в призабойном пространстве остается ограничение: температура воздуха не может быть ниже температуры, поступающей к вентилятору местного проветривания. Как следствие, зачастую отвод тепла с помощью проветривания является малоэффективным [23,83], либо вообще не может быть использован. В связи с этим при разработке мероприятий необходимо использовать другие горнотехнические методы, а также теплотехнические способы нормализации микроклимата.

### **Горнотехнические способы охлаждения воздуха**

К горнотехническим способам охлаждения относят комплекс инженерно-технологических решений, связанных с организацией ведения добычных работ и настройкой системы вентиляции. Их задача снизить приток тепла в выработку или

обеспечить его более эффективный отвод без использования искусственного охлаждения. В таблице 1.5 представлены некоторые возможные горнотехнические способы охлаждения воздуха на калийных рудниках.

Таблица 1.5 — Горнотехнические способы охлаждения

Способ	Суть метода	Механизм охлаждения
Оптимизация схем проветривания	Увеличение тракта движения потока воздуха и исключение рециркуляционных контуров вблизи рабочих зон.	Уменьшение времени контакта воздуха с нагретым массивом. Исключение повторного теплообмена (при рециркуляции) с приводом ВМП.
Увеличение расхода воздуха	Увеличение производительности вентиляторных установок (главных и вспомогательных), снижение аэродинамического сопротивления по тракту движения воздуха.	Ускорение отведения нагретых воздушных масс из рабочей зоны.
Изоляция выработок	Использование для крепления выработок материалов с низким коэффициентом теплопередачи.	Снижение теплопередачи от массива к воздуху.
Изоляция вентиляционных трубопроводов	Покрытие вентиляционных труб материалами с низкой теплопроводностью, с низким коэффициентом черноты.	Снижение величины теплообмена между воздухом и поверхностью вентиляционного трубопровода. Снижение величины лучистого теплообмена.
Изменение сечений горных выработок на стадии проектирования	Выбор оптимального сочетания размеров поперечного сечения выработок и скорости движения воздуха.	Снижение интенсивности теплообмена между поверхностью выработки и воздушным потоком.

Представленные в таблице 1.5 методы обладают ограниченной эффективностью. Основная причина заключается в том, что представленные методы не уменьшают основной источник тепла, а в основном лишь регулируют параметры теплообмена. Описанные методы не способны компенсировать интенсивный тепловой поток, который возникает под воздействием нагретого массива [77,78]. Таким образом, для достижения

нормализации теплового режима в призабойном пространстве необходимо применять комплексные решения и к горнотехническим методам добавлять теплотехнические.

### **Теплотехнические способы охлаждения воздуха**

К теплотехническим способам можно отнести системы кондиционирования в разных видах исполнения. Применение таких методов в сравнении с горнотехническими характеризуется повышенными капитальными и эксплуатационными затратами. Но зачастую только применение теплотехнических способов охлаждения является единственным решением по снижению температур воздуха в горных выработках без ущерба производительности рудника. В таблицу 1.6 сведены основные теплотехнические методы охлаждения воздуха, применяемые при подземной разработке на сегодняшний день [14,80].

Таблица 1.6 — Теплотехнические способы охлаждения

<b>Способ</b>	<b>Суть способа</b>	<b>Механизм охлаждения</b>
Поверхностные системы охлаждения рудничного воздуха	Охлаждение воздуха на дневной поверхности с последующей подачей охлажденного потока по стволам в горные выработки	Охлаждение поступающей в подземные выработки струи за счет поверхностных холодильных машин
Системы охлаждения горизонтов с поверхностным расположением холодильных машин	Производство холода на дневной поверхности и транспортировка хладоносителя на рабочий горизонт рудника	Теплообмен между рудничным воздухом и охлажденным хладоносителем через теплообменные аппараты с отводом тепла на поверхность
Глубинные системы охлаждения с поверхностным отводом теплоты конденсации	Размещение холодильных машин на глубоких горизонтах и оснащение системы трассой для утилизации тепла на поверхность	Охлаждение воздуха через теплообменники рудничного исполнения с транспортировкой теплоты конденсации на поверхность по трубопроводам
Глубинные системы охлаждения с подземным рассеиванием теплоты конденсации	Размещение холодильных машин на глубоких горизонтах	Локальное охлаждение воздуха испарителем с отводом теплоты конденсации в окружающий массив или подземные водоносные горизонты

Способ	Суть способа	Механизм охлаждения
Комбинированные варианты построения систем охлаждения	Совмещение поверхностных и глубинных схем охлаждения	Перераспределение тепловых потоков между поверхностными и подземными контурами охлаждения; комбинированный теплоотвод

Центральные поверхностные системы кондиционирования получили широкое применение на горных предприятиях, где присутствует фактор нагрева до сверхнормативных показателей. Данные системы охлаждают воздушную струю, которая в последующем будет участвовать в проветривании всех горных выработок рудника [105]. Применение систем централизованного охлаждения является малоэффективным, поскольку охлаждающее оборудование находится на большом расстоянии от рабочих зон [92]. Но при этом данный недостаток компенсируется отсутствием ограничения по размеру оборудования, поэтому могут быть спроектированы системы гораздо большей мощности, нежели подземные агрегаты для охлаждения.

Использование подземных участковых машин является наиболее эффективным за счет снижения потерь тепла при транспортировке хладагента до рабочих зон. Особым преимуществом в данном вопросе является исключение из тракта транспортировки вертикальных стволов [92]. В большинстве случаев для охлаждения технической воды, применяемой в центральной подземной холодильной машине, необходим второй контур высокого давления, который прокладывается в стволах и утилизирует тепло на поверхность [104]. При больших глубинах ведения горных работ, охлажденная вода, движущаяся по стволу вниз, может значительно нагреваться. Так, например, на шахте Vall Reefs в Южной Африке это повышение температуры составило 2,34 °C на 1000 метров. Сложностями при эксплуатации данного вида системы охлаждения являются вопрос утилизации тепла, выделяемого от работы оборудования, и вопрос размещения оборудования в условиях ограниченного пространства.

Применение участковых холодильных машин так же, как и поверхностных комплексов, характеризуется высокими капитальными затратами и не всегда оптимально в условиях подземных рудников. Существует опыт использования системы местного кондиционирования воздуха тупиковой выработки. Данный тип охлаждения предназначен для нормализации тепловой обстановки в одной горной выработке, в зоне работы проходческо-очистного комплекса. Несомненным преимуществом подобных

систем перед централизованными системами охлаждения является величина энергозатрат на работу оборудования и улучшенные показатели мобильности системы. Но тем не менее, сложности при организации перемещения оборудования по-прежнему сохраняются, что подтверждает актуальность разработки локальных систем кондиционирования [16]. Также к сложностям эксплуатации подобной системы стоит отнести отвод тепла ввиду того, что воздух, выходящий из градирни, может нагреваться свыше 50 °С и направляется по горным выработкам к вентиляционному стволу. В связи с этим актуальным вопросом является разработка еще более малых систем – маломощных систем локального кондиционирования воздуха для рабочих мест машинистов комбайнов в тупиковых горных выработках. Под рабочим местом понимается пространство внутри кабины и некоторая область возле кабины машиниста. Для реализации подобных систем необходимы научные исследования, основанные на многовариантном моделировании аэродинамических процессов.

#### **1.4 Анализ существующих подходов к моделированию распределения тепла в горных выработках**

Эффективный анализ вентиляционных сетей, характеризующихся высокой разветвленностью, во многом зависит от правильных подходов и методов, используемых для количественной оценки многочисленных взаимосвязанных физических и технических процессов, которые происходят в горных выработках. Организация эффективной вентиляции на любом из исследуемых рудников будет требовать глубокого научного изучения особенностей проветривания, а также тепло- и массообмена в подземных рудниках. При этом обязательно должны учитываться уникальные факторы, которые характерны для исследуемого рудника.

Примером тому является исследуемый объект – калийный рудник Гремячинского месторождения (ООО ЕвроХим–ВолгаКалий). При моделировании теплофизических процессов, о которых пойдет речь в данном исследовании, важно учитывать основные факторы, которые формируют микроклимат на рабочем месте: температура нетронутого массива, работа добычного оборудования, используемая система вентиляции и т.д. Тепловыделения от описанных источников существенно влияют на структуру воздушного потока в рабочих зонах, а также на эффективность разрежения и удаления вредных примесей из атмосферы в тупиковых выработках [116].

Вопросами расчетов микроклиматических параметров посвящены работы Воропаева А.Ф. [5], Щербаня А.Н. [79], Дядькина Ю.Д. [11], Медведева Б.И. [42], Кремнева О.А. [78], Кочнева К.В. [28], Гендлера С.Г. [7], Левина Л.Ю. [32,34], Зайцева А.В. [14] и многие другие. При этом можно выделить определенные

исследования, направленные на изучение процессов теплообмена в горных выработках именно калийных рудников. Так, например, И.И. Медведев, А.Е. Красноштейн в работах [24,43] рассматривали процессы теплообмена с учетом анизотропии свойств калийного массива. В работе Г.З. Файнбурга [29,71] рассмотрены процессы тепломассопереноса на основе диффузионно-сетевых методов расчета. Описанные исследования охватывают значительный объём теоретических и прикладных работ, посвящённых изучению тепловых процессов в подземных выработках, однако в них не применяются современные методы трёхмерного численного CFD-моделирования.

Проблема определения наиболее подходящих параметров для вентиляции исследуемого объекта, в том числе и для тупиковых выработок, чаще всего решается с использованием методов CFD моделирования [86], которые считаются наиболее эффективными для анализа трехмерной структуры воздушного потока и содержащихся в ней примесей, учитывая при этом геометрию исследуемой области.

Сегодня исследователи используют различные модели турбулентности [25] для описания тепловых и аэродинамических процессов в тупиковых горных выработках. К таковым относятся RNG k-epsilon [102], модель Reynolds stress [85], модель Spalart-Allmaras [129], стандартную k-epsilon модель [82] и модель Realizable k-epsilon [108]. Все существующие на сегодняшний день модели имеют свои особенности, но в то же время, простые полуэмпирические модели, основанные на гипотезе Буссинеска, могут эффективно отражать общие закономерности движения воздуха.

В настоящее время опубликовано большое количество работ, посвященных решению практических задач в тупиковых горных выработках, с применением при этом подхода CFD моделирования. В исследованиях рассматриваются разные способы проветривания тупиковых выработок: нагнетательный [93,97] и всасывающий [97]. Также рассмотрены процессы выноса вредных примесей из тупиковых выработок, включая газы [96,120], пыль [118,94], твердые частицы [88]. Рассмотрен вынос избыточного тепла [128,110]. Данный подход также позволяет осуществлять многовариантные расчеты, учитывая при этом различные типы горно-шахтного оборудования [123,115].

При изучении тепломассообмена в тупиковых выработках, пройденных проходческо-очистными комбайнами, важно учитывать влияние горной техники и как источников лобового сопротивления, и с точки зрения аэродинамических и тепловых эффектов, которые они генерируют [116,130]. Не исключается и влияние работы горных машин на изменение аэродинамических потоков и тепловой обстановки. Данная

гипотеза будет рассмотрена в данном диссертационном исследовании. Решение подобных задач осуществляется с использованием динамических сеток [90]. Описанный подход ранее уже применялся учеными исследователями для изучения динамики подъемных сосудов в вертикальных стволах шахт [126], а также для продвижения забоя при строительстве горных выработок [89]. Влияние движения оборудования на тепловой режим в тупиковой горной выработке калийного рудника на сегодняшний день не рассматривалось и является одной из задач данного исследования.

## **1.5 Цели и задачи исследования**

На основе всестороннего анализа актуальной проблемы и оценки имеющихся подходов к ее решению сформирована цель данного исследования - нормализация микроклиматических параметров на рабочем месте машиниста проходческо-очистного комбайна в условиях тупиковых выработок калийных рудников, с учетом тепловыделений горного оборудования, породного массива и системы вентиляции, формирующих температурный режим. В работе предложен способ управления тепловым режимом в ограниченной зоне рабочего пространства машиниста комбайна с минимальными изменениями параметров воздуха во всем объеме тупиковой выработки.

В соответствии с поставленной целью исследования сформированы следующие задачи, направленные на ее реализацию:

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 температур 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.

## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В УСЛОВИЯХ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК ГРЕМЯЧИНСКОГО ГОК

Экспериментальная часть исследования производилась в горных выработках подземного рудника Гремячинского ГОК. Замеры осуществлялись на эксплуатирующихся проходческо-очистных комбайновых комплексах, работающих в тупиковых выработках. Выбор исследуемых комбайновых комплексов определялся следующими условиями:

- комбайн должен работать в тупиковом забое и проветриваться вентилятором местного проветривания;
- количество подаваемого воздуха в рабочие зоны тупиковых выработок должно быть не менее требуемого расчетного значения;
- комбайновый комплекс должен находиться в исправном состоянии и работать в нормальном режиме.

### Описание методики проведения экспериментальных исследований

#### 1. Обследование фактических параметров породного массива.

Несмотря на то, что измерение геотермии чаще всего определяется скважинной термометрией [127,113,100], на эксплуатируемых рудниках имеется возможность использования метода, основанного на прямом измерении параметров температур породы, стенок и рудничного воздуха [13].

При решении теплофизических задач путем многовариантного математического моделирования зачастую требуется знать корректные значения теплофизических свойств массива горных пород. К основным теплофизическим свойствам горных пород относятся [10]:

1. *Удельная теплоёмкость горной породы* – это количество теплоты, которое необходимо сообщить единице массы горной породы, чтобы повысить её температуру на 1 °С.
2. *Теплопроводность горной породы* – способность горной породы передавать тепловую энергию от одной точки к другой, если между этими точками по тем или иным причинам появится разница температур.
3. *Плотность горной породы* – отношение массы к объему исследуемого образца горной породы.

Определение естественной температуры породного массива осуществлялось путем контактного метода измерения температуры с использованием канального термометра высокоточного мониторинга testo 110. Измерения осуществлялись в шпурах

длиной 3 м, так как такая глубина позволяет исключать влияние окружающей среды на полученные показания. С целью исключения нагрева массива от бурового оборудования замеры производились не ранее чем через 2 суток с момента бурения [6].

Определение теплофизических свойств массива осуществлялось в лабораторных условиях путем отбора образцов керна с разных участков шахтного поля. Определение удельной теплоёмкости горной породы производилось методом сравнения кривых охлаждения эталонного и исследуемого образцов [26]. Определение теплопроводности проводилось на экспериментальном стенде с использованием метода стационарного теплового потока, при котором образец размещался между медными дисками с обеспечением теплового контакта через теплопроводящую пасту, а измерения плотности теплового потока и температур верхней и нижней граней осуществлялись прибором ИТП-МГ4.03 «ПОТОК». Для определения плотности образцов горной породы, имеющих форму цилиндра, использовался стандартный метод, основанный на определении массы и объема образца. Масса образца определялась с помощью электронных лабораторных весов, а величина объема вычислялась математически.

## 2. Обследование параметров рудничной атмосферы и факторов, формирующих ее.

Условием выбора времени проведения замеров являлся промежуток времени, для которого были исключены изменения режимов работы вентиляторов главного проветривания, а также изменение схемы общешахтной вентиляции и распределения воздуха.

Определение расхода воздуха в горных выработках осуществлялось методом косвенных измерений на основании измерений скорости воздушного потока и площади поперечного сечения выработки [44]. Скорость воздуха определялась при помощи рудничного анемометра АПР-2М путем обвода всего сечения горной выработки. Минимальная продолжительность проведения измерений определялась временем однократного перемещения средства измерений в сечении горной выработки по змееобразной траектории от одного борта выработки к другому. Площадь поперечного сечения определялась при помощи лазерного дальномера Leica Disto D2 путем прямых измерений отдельных участков сечения выработки и дальнейшего вычисления площади сечения на основании измеренных параметров.

Определение температуры и влажности рудничного воздуха в подземной выработке выполнялось методом прямых измерений [45]. Для определения температуры и влажности использовался термогигрометр Fluke 971. Температура поверхности стенок выработки и поверхности оборудования определялась пирометром Fluke 568, а также тепловизором Hikmicro G60. В исследуемой выработке размещались регистраторы

непрерывной записи аэрологических параметров, которые фиксировали: время измерения, температуру воздуха, относительную влажность и абсолютное давление.

## **2.1 Оценка влияния породного массива на формирование температуры в тупиковых выработках**

Система вентиляции калийных рудников представляет собой протяженную сеть горных выработок. Воздух, поступающий для проветривания проходческо-очистной рабочей зоны, может пройти по горным выработкам расстояние в несколько километров. Как следствие, в результате постоянного контакта движущегося потока воздуха с поверхностью породного массива нельзя не учитывать процесс теплопередачи между движущимся воздухом и стенками выработок [14]. В рамках данного исследования в подземном руднике Гремячинского ГОК проведена серия натурных исследований, направленных на изучение тепловых параметров массива горных пород.

### **Анализ изменения температуры воздуха при его движении по горным выработкам**

По рисунку 2.1 можно проанализировать изменение температуры воздуха при его движении от воздухоподающего ствола до вентиляционного ствола через выработки западного и восточного направлений шахтного поля. Методология данного исследования заключалась в проведении замеров по тракту движения воздушной струи. Замеры осуществлялись в летний период времени с использованием термогигрометра Fluke 971. На момент проведения замеров атмосферный воздух имел параметры, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Параметры атмосферного воздуха на момент проведения исследования.

<b>Место замера</b>	<b>Тип струи</b>	<b>Температура</b>	<b>Влажность</b>
Атмосферный воздух на пром. площадке предприятия	Свежая, поступающая в рудник	30,5 °С	25%
Сопряжение вентиляционного ствола и вентиляционного канала	Исходящая струя	22 °С	33%

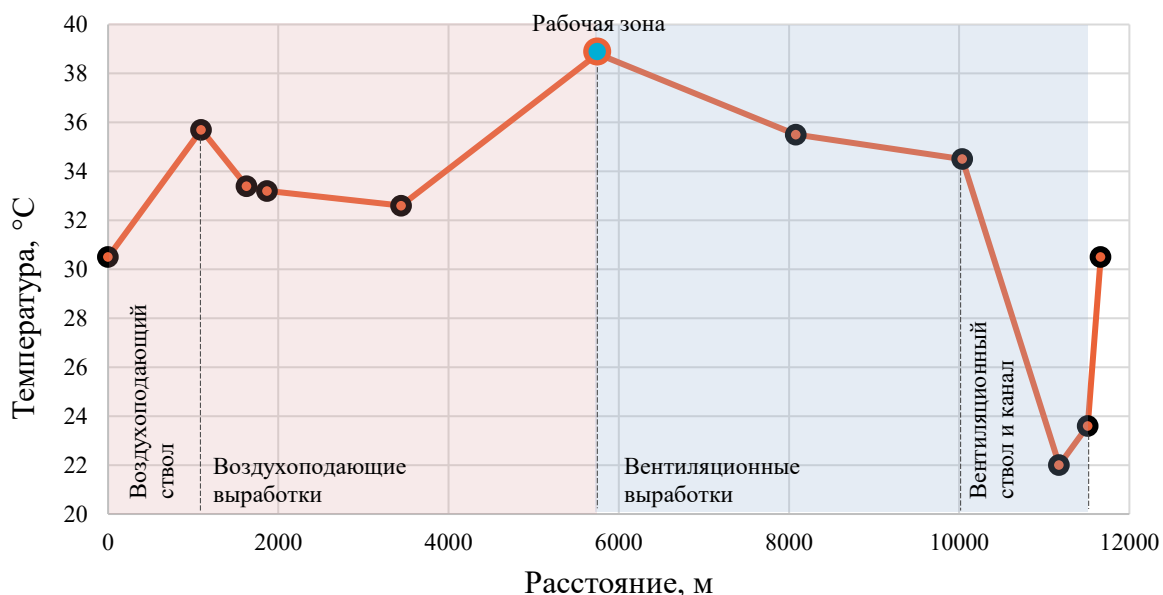


Рисунок 2.1 – Термограмма направления шахтного поля исследуемого рудника по маршруту «воздухоподающий ствол – выработки направлений – вентиляционный ствол»

Анализ результатов натурных исследований температуры по тракту движения воздушной струи показал, что температура поступающего в горные выработки воздуха уже имеет превышения (рисунок 2.1) относительно требований ФНиП №505 «Правила безопасности при ведении горных работ...» [54]. Температура атмосферного воздуха на момент измерений составляла 30,5 °C. Температура на сопряжении ствола с горизонтом - 35,8 °C, а в призабойном пространстве - 39 °C, при допустимой ФНиП величине 26 °C.

Относительная влажность воздуха, движущегося в горных выработках, изменялась незначительно – в интервале от 25 % (воздухоподающие выработки) до 30 % (вентиляционные выработки).

Высокие фиксируемые температуры воздуха в горных выработках обосновываются разными факторами, формирующими тепловой режим, как горно-геологическими, так и техническими. В дальнейшем было выполнено детальное исследование основных факторов, формирующих тепловую обстановку в призабойном пространстве.

### Определение геотермии Гремячинского месторождения

Для определения данного параметра было выполнено обследование 12 точек в наиболее отдаленных местах шахтного поля. Осуществлялись замеры температуры воздуха  $T_v$ , температуры стенок  $T_{ст}$  выработки и температуры в шпурах  $T_m$ , глубина которых составляла не менее 2 м. Результаты представлены в таблице 2.2. Также в

таблице приведены параметры глубин в исследуемых точках  $H$  и относительная влажность воздуха  $\varphi_v$ .

Таблица 2.2 — Естественная температура породного массива и параметры микроклимата рабочих зон.

Место замера	$T_m$ °С	$T_{ст}$ °С	$T_v$ °С	$\varphi_v$ %	$H$ м
ПВВТШ-1 (1 ЗП)	33,0	35,3	32,9	30,1	1115,5
БКШ (1 ЗП)	34,1	37,2	35,9	29,5	1116,0
БКШ (1 ЗП)	33,7	37,2	36,3	26,5	1116,0
Трансп. бойка № 17 (1 ЗП)	34,0	36,2	35,6	24,0	1116,0
БШ-2 (1 ЗП)	32,8	34,9	34,4	24,8	1120,5
ПВВТШ-1 (1 ЗП)	33,0	34,2	34,0	27,5	1126,5
БШ-11 (1 ЗП)	33,5	37,5	35,0	21,7	1129,0
БШ-11 (1 ЗП)	33,6	36,7	35,0	21,7	1129,0
БВТШ-14 (1 ЗП)	33,7	36,0	35,7	43,4	1133,0
БВТШ-14 (1 ЗП)	33,4	36,0	35,7	43,4	1135,0
ГСВКВШ (2 СП)	34,5	35,8	35,2	27,8	1165,0
ГСВТШ-2 (2 ВП)	33,2	35,8	36,2	26,5	1165,0

В большинстве выполненных замеров температура воздуха превышала естественную температуру породного массива, однако оставалась ниже температуры стенок горной выработки. Данная ситуация объясняется остаточным нагревом стенок выработки от работающего технологического оборудования, включая бурильные установки, проходческо-очистные комплексы и машины с двигателями внутреннего сгорания.

Геотермический градиент месторождения (°С/м), описывающий прирост температуры массива горных пород на каждый метр, определяется по формуле:

$$\Gamma = \frac{T_m - T_0}{h - h_0}, \quad (2.1)$$

где  $T_m$  – естественная температура горных пород на глубине  $h$ , °С;  $h_0$  – глубина зоны постоянных температур (нейтральный слой), м;  $T_0$  – температура в нейтральном слое, °С.

Геотермическая ступень (м/°С), характеризующая интервал глубины, на котором температура горных пород увеличивается на 1 °С, определяется по формуле:

$$G = \frac{l}{L}. \quad (2.2)$$

В результате аппроксимации результатов, полученных при выполнении расчетов для 12 исследуемых точек по формулам (2.1) и (2.2), установлено, что значение геотермической ступени равняется 44,0 м/°С, а геотермического градиента 0,0227 °С/м с доверительным интервалом  $\pm 0,00032$  °С/м. Низкое значение стандартного отклонения 0,0005 °С/м указывает на высокую достоверность полученных данных.

### Определение теплофизических свойств массива

Для определения теплофизических параметров породного массива в рамках экспериментальных исследований проведен отбор образцов керна для дальнейшего их обследования в лабораторных условиях. В рамках лабораторных испытаний были определены тепловые параметры продуктивного пласта исследуемого месторождения. Результаты исследований теплофизических свойств сильвинита, содержащегося в продуктивном пласте Гремячинского ГОК, сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 — Полученные результаты исследования теплофизических свойств сильвинита на руднике Гремячинского ГОК

Исследуемый параметр	Величина	Единица измерения
Удельная теплоемкость	442,8	Дж/(кг·°С)
Теплопроводность	2,75	Вт/(м·°С)
Плотность	2,06	г/см <sup>3</sup>

## 2.2 Анализ факторов формирования теплового режима в тупиковых выработках

Для набора статистических данных было исследовано более 10 комбайновых комплексов. Замеры производились при разных способах проветривания: нагнетательном, всасывающем и комбинированном. В разделе представлен комбайновый комплекс с наибольшим количеством собранных экспериментальных

данных за период экспериментальных обследований с августа 2023 года по ноябрь 2024 года.

Исследуемая тупиковая выработка представляет собой проходческую рабочую зону с расположенным в ней комбайном «Урал-20Р» и самоходным вагоном В17К. На рисунке 2.2 представлено сечение, в котором осуществлялось исследование изменения поля скоростей.

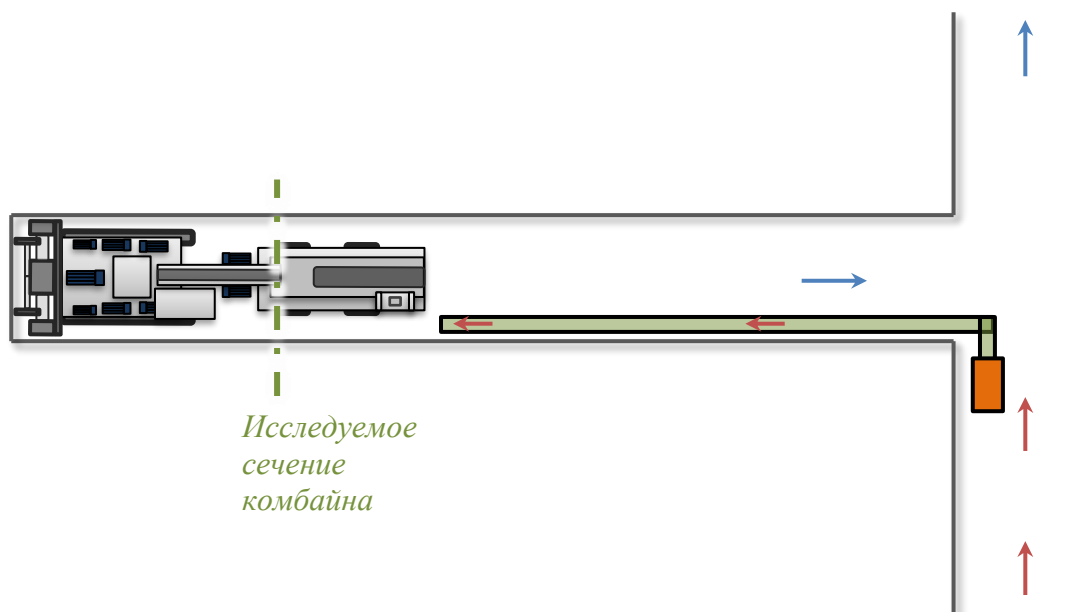


Рисунок 2.2 – Схема расположения исследуемого сечения

Замеры производились в точках на разной высоте. Площадь поперечного сечения выработки у комбайна  $15,5 \text{ м}^2$ . Расстояние между замерными точками определялось путем деления высоты на равные отрезки (рисунок 2.3).

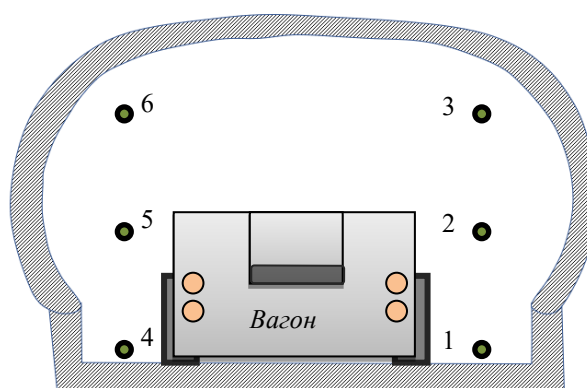


Рисунок 2.3 – Расположение точек замеров

Проветривание забоя исследуемого комбайнового комплекса осуществлялось вентилятором FBD 8.0 2x55. Расход воздуха в выработке составил  $4,0 \text{ м}^3/\text{с}$ , при скорости воздуха на выходе из вентстава  $8,5 \text{ м/с}$  и площади его поперечного сечения  $0,45 \text{ м}^2$ .

Отставание конца трубопровода от кабины машиниста – 10 м. Способ проветривания – нагнетательный.

В ходе проведения замеров для последующей валидации моделей выполнено измерение изменения распределения полей скоростей при наличии вагона возле комбайнового комплекса и при его движении на разгрузку. Замеры осуществлялись в сечении выработки, проходящем через середину самоходного вагона, а точки замеров представлены на рисунке 2.3. Три серии выполненных замеров скоростей воздуха представлены в таблицах 2.4 - 2.6.

Таблица 2.4 – Фиксируемые скорости потоков воздуха при нагнетательном способе проветривания (серия замеров 1)

	<b>Скорость воздуха в точках замеров, м/с</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
С вагоном	0,66	0,76	0,63	3,32	2,56	1,44
Без вагона	0,37	0,38	0,81	2,22	1,63	1,30

Таблица 2.5 – Фиксируемые скорости потоков воздуха при нагнетательном способе проветривания (серия замеров 2)

	<b>Скорость воздуха в точках замеров, м/с</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
С вагоном	0,66	0,75	0,37	3,37	1,71	0,78
Без вагона	0,41	0,42	0,87	2,25	1,39	0,46

Таблица 2.6 – Фиксируемые скорости потоков воздуха при нагнетательном способе проветривания (серия замеров 3)

	<b>Скорость воздуха в точках замеров, м/с</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
С вагоном	0,48	0,75	0,72	2,82	2,02	0,72
Без вагона	0,74	0,61	0,85	2,25	1,38	0,64

Результаты измерения температуры воздуха в исследуемых точках показали однородность температур по всему сечению, что объясняется высокой степенью тепловыделения от оборудования в тупиковой выработке.

Термографические исследования осуществлялись с использованием тепловизора Hikmicro G60. Диапазон измерения данного прибора составляет от  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при этом абсолютная погрешность измерений не превышает  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  при измерении температур до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Точечные измерения температуры приводов производились с помощью инфракрасного термометра Fluke 568 с абсолютной погрешностью измерений  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  при измерении положительных температур поверхности. На рисунках 2.4 - 2.6 представлены тепловизионные снимки исследуемого проходческо-очистного комбайна.

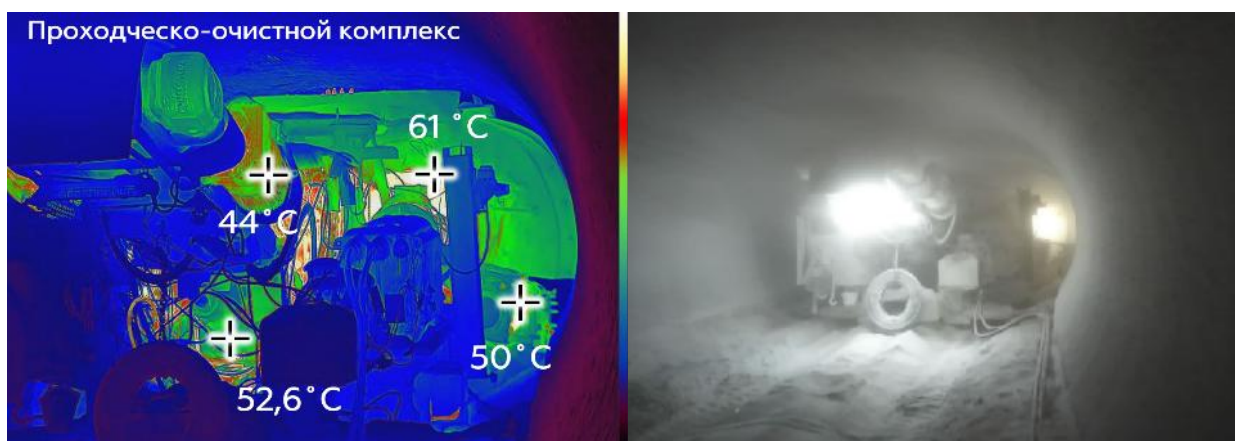


Рисунок 2.4 – Термограмма проходческо-очистного комбайна типа «Урал-20Р» (вид сзади)

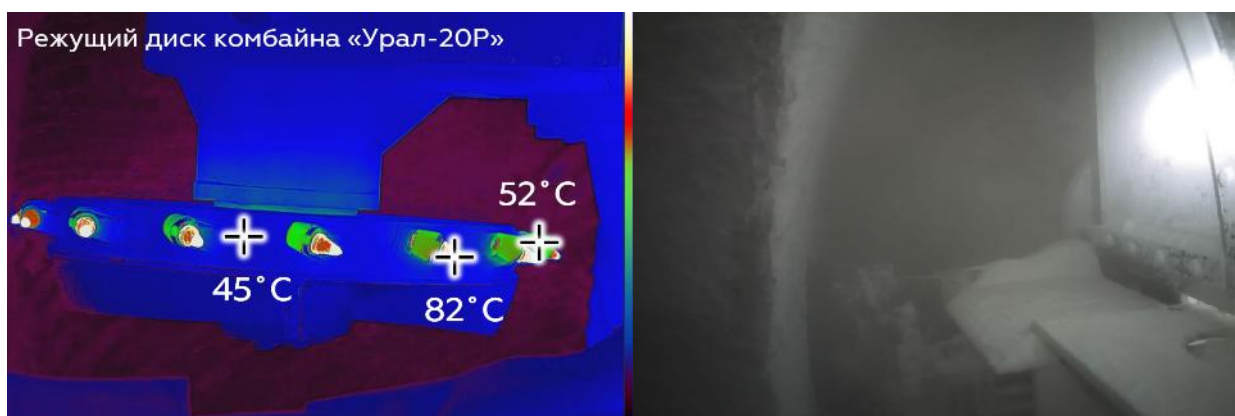


Рисунок 2.5 – Термограмма режущего диска проходческо-очистного комбайна



Рисунок 2.6 – Термограмма рабочего места машиниста проходческо-очистного комбайна

Термографический анализ осуществлялся путем нанесения на тепловизионные снимки результаты замеров, выполненных инфракрасным термометром, который обладает меньшей величиной абсолютной погрешности. Анализ проведенного тепловизионного и температурного обследований показывает, что поверхность электрических приводов добычного комбайна может нагреваться свыше 60 °С. Комбайн типа «Урал-20» оборудован десятью электрическими двигателями. В ходе натурных исследований была выявлена температура каждого из приводов. Результаты представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 — Параметры электрических приводов на комбайне типа «Урал-20Р».

№	Назначение привода	Мощность	Частота вращения	Средняя измеренная температура приводов
1	Привод №1 режущих дисков	160 кВт	1000 об/мин	55 °С
2	Привод №2 режущих дисков			61 °С
3	Привод переносного вращения	75 кВт	1500 об/мин	49 °С
4	Привод отбойного устройства	45 кВт	1500 об/мин	45 °С
5	Привод №1 бермового органа	75 кВт	1500 об/мин	53 °С
6	Привод №2 бермового органа			50 °С
7	Привод №1 конвейера	30 кВт	1500 об/мин	46 °С
8	Привод №2 конвейера			44 °С
9	Привод насосной станции	55 кВт	1000 об/мин	52 °С
10	Привод пылеотсоса	30 кВт	3000 об/мин	50 °С

Суммарная электрическая мощность исследуемого комбайна составила– 735 кВт.

Конструкция планетарно-дискового исполнительного органа проходческо-очистного комбайна типа «Урал-20Р» характеризуется небольшим количеством резцов, одновременно контактирующих с поверхностью разрушаемого массива. Как следствие, оборудование передает большие усилия на контактирующие резцы, которые в свою очередь способны нагреваться до температур выше 80 °С. С целью повышения долговечности режущего инструмента исполнительного органа предусмотрен период охлаждения резцов в тот момент, когда они выходят из контакта с поверхностью массива.

Стоит также отметить высокие температуры поверхности панели управления, которая располагается в кабине проходческо-очистного комбайна. Она включает в себя рычаги управления горной машиной, которые регулируют подачу гидравлической жидкости. Тем самым панель управления является сильным источником тепловыделений в кабине комбайнера. Локальные элементы управления нагреваются до температур свыше 50 °С.

На рисунках 2.7 и 2.8 приведены результаты тепловизионного обследования исследуемого самоходного вагона, входящего в состав проходческо-очистного комплекса.

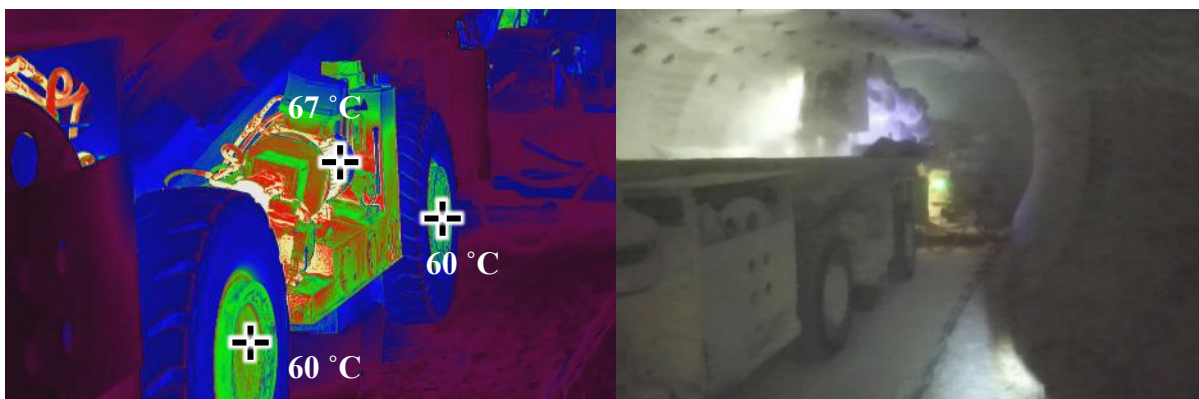


Рисунок 2.7 — Термограмма исследуемого самоходного вагона

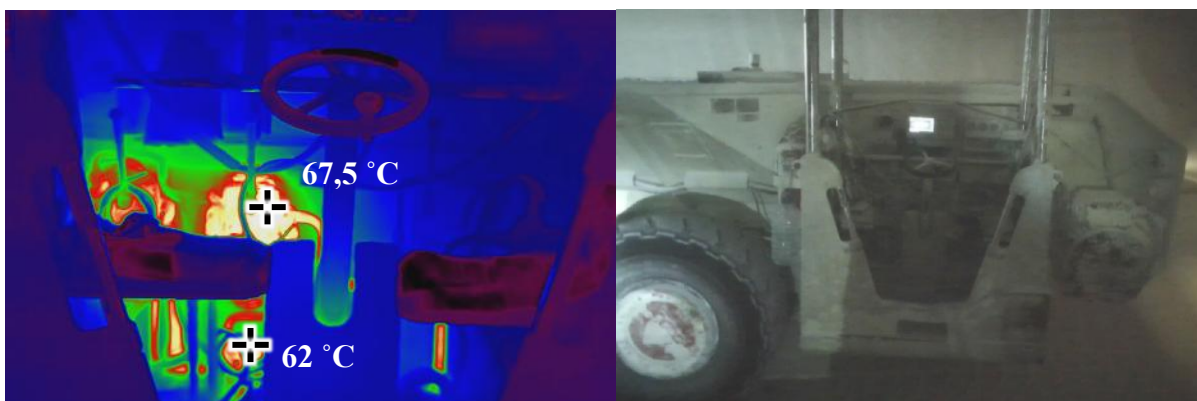


Рисунок 2.8 — Термограмма рабочего места машиниста самоходного вагона

Согласно результатам полученных замеров основными источниками тепловыделения самоходного вагона являются электродвигатели и гидравлическое оборудование. В кабине, где расположено рабочее место машиниста самоходного вагона, установлена аппаратура управления, в том числе и насос-дозатор, выполняющий функцию рулевого механизма. Также имеются гидроблоки управления кабельным барабаном, подъемом кузова, стояночным тормозом и другими элементами. Поскольку элементы управления машиной работают от гидропривода, то температура некоторых участков внутренней части кабины достигает 67 °С.

Ходовая часть самоходного вагона представляет собой четырехколесное шасси с четырьмя приводными управляемыми электромотор-колесами. Каждое колесо оснащено собственным электромотором.

Таблица 2.8 — Параметры электрических приводов на самоходном вагоне типа В17К.

№	Назначение привода	Мощность	Частота вращения	Количество приводов	Температура приводов
1	Ходовая часть	25 кВт	1000 кВт	4	60 °С x 4 шт.
2	Привод конвейера	22 кВт	1000 кВт	1	49 °С
3	Насосная установка	15 кВт	1000 кВт	1	67 °С

Суммарная максимальная электрическая мощность составляет 137 кВт, что составляет 19% от максимально возможной мощности добычного комбайна. Результаты замеров показали, что электромотор-колеса имеют одинаковую температуру равную 60 °С. Наиболее нагретым элементом самоходного вагона является маслостанция, температура поверхности которой 67 °С.

Динамические замеры аэрологических параметров в горных выработках подразумевают использование регистраторов параметров, способных вести запись на протяжении длительного времени с последующим их сохранением во внутренней памяти. Данный метод является на сегодняшний день самым перспективным методом

контроля рудничных параметров. Подобный вывод сделан в связи с тем, что система вентиляции подземного рудника характеризуется постоянным изменением своих параметров ввиду нескольких факторов: выполнения технологических параметров внутри замкнутого объема и высокой производительности рудника.

В ходе исследования выполнены замеры изменения температурного режима при разных технологических процессах, выполняемых проходческо-очистным комплексом. Замеры производились при помощи беспроводных регистраторов данных Kestrel с абсолютной погрешностью прибора  $\pm 0,5$  °C. Один измерительный датчик крепился в призабойном пространстве, а второй в устье камеры. В это же время в журнал замеров вносились пометки, характеризующие статус работы оборудования и перемещение самоходного вагона. Формирование массива значений осуществлялось в виде множества замеров, которые выполнялись через установленный период времени – 10 секунд. Результаты замеров представлены на рисунке 2.9.

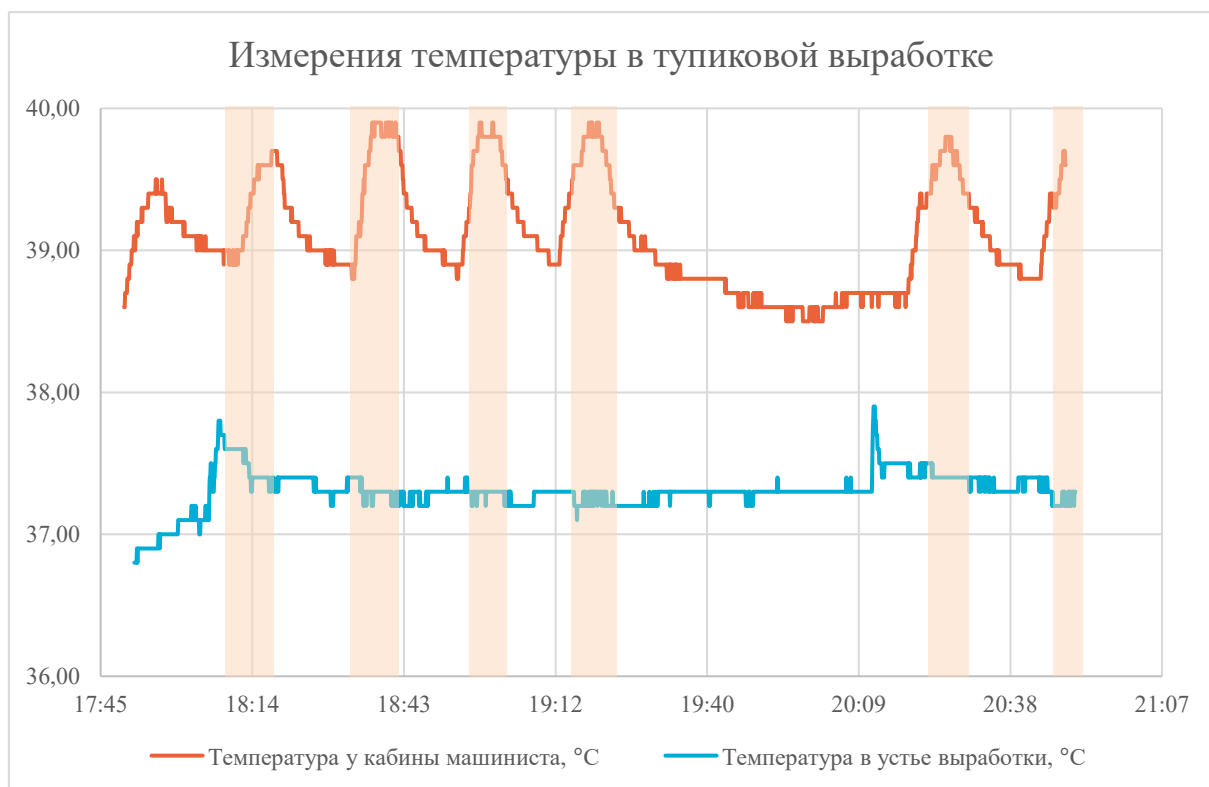


Рисунок 2.9 — Тренды изменения показаний температуры в исследуемой выработке

На рисунке 2.9 представлены результаты анализа натуральных замеров, произведенных в устье выработки и в рабочем пространстве машиниста комбайна. Датчик, располагающийся в устье, был смонтирован на стенке выработки, а в районе рабочего места машиниста – на кабине комбайна (снаружи). На диаграммах оранжевым цветом выделены временные промежутки работы проходческо-очистного комбайна, которые на графике идентифицируются как один цикл.

Анализ полученных результатов показал, что для каждого цикла характерно наличие своего экстремума величины температуры рудничного воздуха. Максимумы графика температуры датчика, находящегося в прикабинном пространстве (оранжевая линия), варьируются в диапазоне от 39,5 °С до 39,9 °С. В среднем температура исходящего воздуха при работе комбайна и одновременной погрузке самоходного вагона увеличивается на 1 °С. Графики датчика, находящегося в устье выработки (голубая линия) не имеют четко выраженных экстремумов. Наличие двух пиков свидетельствует о длительном простое самоходного вагона в районе самого датчика. В остальном проезд самоходного транспорта мимо точки измерения не показывал значительного прироста температуры.

В рамках натурных замеров произведено обследование изменения температуры воздуха по тракту его движения при поступлении в тупиковую выработку. Результаты замеров представлены на рисунке 2.10.

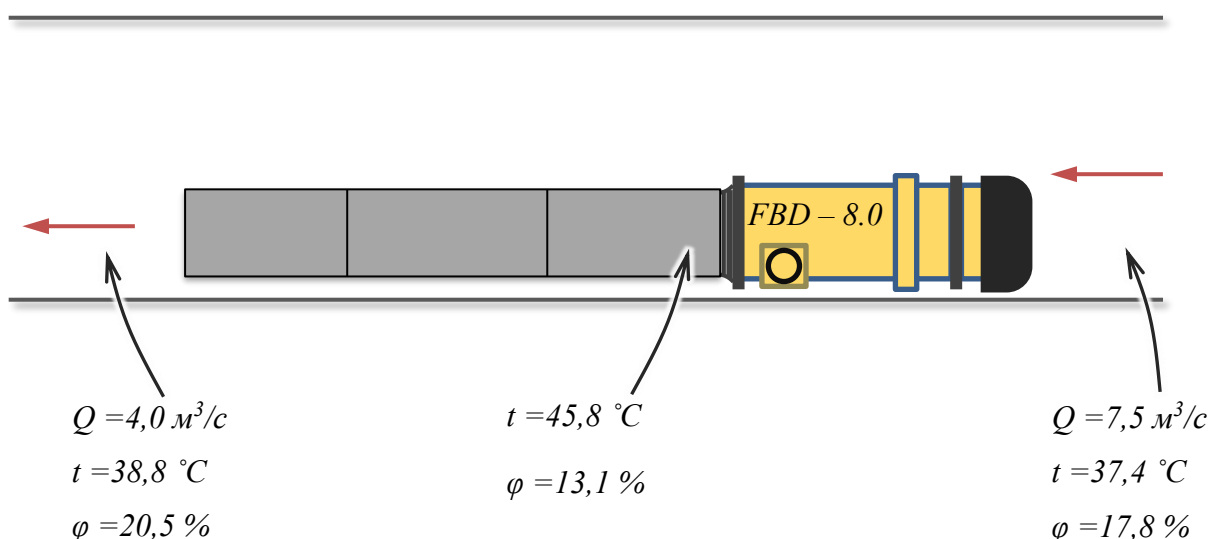


Рисунок 2.10 – Схематичное расположение точек замеров температуры при обследовании ВМП и полученные результаты

Температура воздуха, подходящего к вентилятору местного проветривания, составляла 37,4°С. Работа электропривода вентилятора, состоящего из двух электродвигателей мощностью каждого по 55 кВт, нагревала воздух до 45,8°С. Далее посредством теплообмена струи свежего воздуха со стенками вентиляционного трубопровода температура постепенно снижалась и на выходе из става равнялась 38,8°С. На рисунке 2.11 представлен тепловизионный снимок работающего вентилятора местного проветривания марки FBD – 8,0.

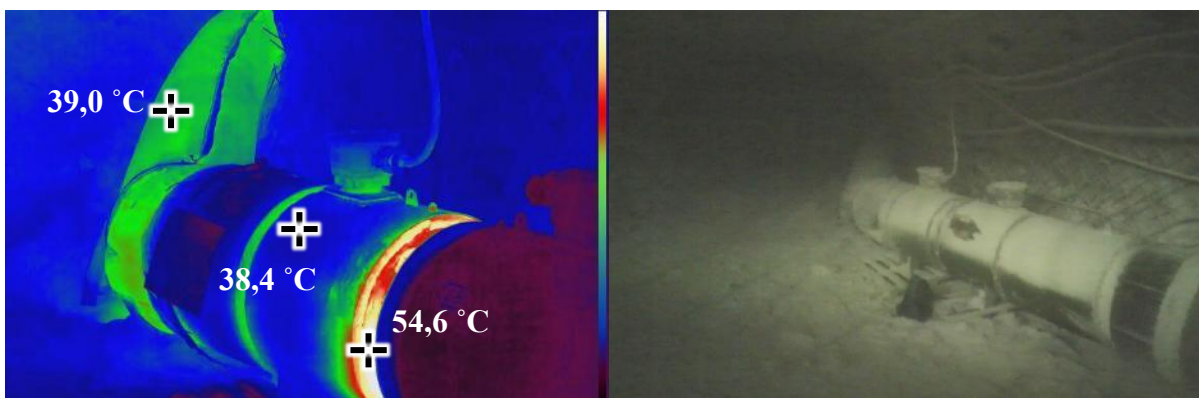


Рисунок 2.11 — Термограмма вентилятора местного проветривания FBD–8.0

Анализ полученного снимка показал, что наибольшая температура фиксируется в зоне расположения рабочих колес вентилятора, величина которой составила 54,6 °С.

На основе данного подхода выполнен комплекс исследований вентиляторов местного проветривания на исследуемом руднике. Рассчитано приращение температуры воздуха, обусловленное тепловыделениями от работы вентилятора местного проветривания. Результаты сведены в таблицу 2.9.

Таблица 2.9 — Результаты обследования вентиляторов местного проветривания

№	Тип вентилятора	Мощность привода	Температура		Приращение температуры на ВМП	Температура в забое (№3)
			Перед ВМП (№1)	После ВМП (№2)		
1	FBd-7,1	2x45кВт	33,6 °С	40,3 °С	6,7 °С	37,5 °С
2	FBd-7,1	2x45кВт	37,5 °С	42,8 °С	5,3 °С	39,1 °С
3	FBd-7,5	1x45кВт	34,0 °С	36,3 °С	2,3 °С	36,8 °С
4	FBd-7,5	2x45кВт	32,3 °С	37,4 °С	4,6 °С	39,5 °С
5	FBd-7,5	2x45кВт	35,3 °С	38,5 °С	3,2 °С	36,7 °С
6	FBd-7,5	2x45кВт	32,8 °С	37,4 °С	4,6 °С	39,8 °С
7	FBd-8,0	2x75кВт	35,0 °С	42,2 °С	7,2 °С	37,5 °С
8	FBd-8,0	2x75кВт	31,3 °С	35,9 °С	4,6 °С	38,3 °С
9	FBd-8,0	2x75кВт	37,4 °С	45,8 °С	8,4 °С	38,8 °С

Таким образом, результаты обследования показали, что средняя величина приращения температуры в результате нагрева за счет электропривода на вентиляторах типа FBd-7,1 и 7,5 составила 4,5 °С. В то же время на вентиляторах местного проветривания типа FBd-8,0 средняя величина приращения составила 8,2 °С, что обуславливается более высокой мощностью агрегатов. Для оценки теплового влияния

вентиляторов местного проветривания на рудничную атмосферу в призабойном пространстве рассчитана удельная величина приращения температуры на 1 кВт мощности привода по следующей формуле:

$$q_t = \frac{\Delta t}{N}, \quad (2.3)$$

где  $q_t$  – удельное приращение температуры, °С/кВт;  $\Delta t$  – рост температуры воздуха на вентиляторе, °С;  $N$  – мощность привода, кВт.

На основании расчетов среднее удельное значение для обследуемых вентиляторов проветривания составляет 0,046 °С/кВт. Полученные результаты показали, что осевые вентиляторы местного проветривания оказывают существенное влияние на температурный режим в призабойном пространстве. Значительная часть электрической мощности преобразуется в тепло, которое в последующем, при нагнетательной схеме проветривания, поступает в зону расположения проходческо-очистного комплекса. В связи с этим возникает необходимость изучения альтернативных способов организации вентиляции призабойного пространства. Одним из таких способов является использование всасывающего способа проветривания тупиковой выработки [35].

### **2.3 Оценка влияния способа проветривания на температуру в тупиковых выработках**

В рамках исследования выполнены опытно-промышленные испытания всасывающего способа проветривания, целью которого являлось определение степени влияния работы вентилятора местного проветривания на температурную обстановку в исследуемой выработке. Исследователями была выдвинута гипотеза, что при всасывающем способе проветривания тупиковой выработки температура должна быть ниже, чем при нагнетательном. Это связано с тем, что по тракту движения воздуха исключается один из возможных факторов тепловыделения – нагнетательный вентилятор местного проветривания. Для более подробного изучения данного процесса в исследуемой выработке было выполнен эксперимент, суть которого заключалась в регистрации температуры воздуха при изменении способа проветривания тупиковой выработки. Технологические операции по изменению способа проветривания производились непрерывно, без остановки проходческо-очистного комплекса на длительное время.

В качестве всасывающего вентилятора местного проветривания был использован вентилятор FBD-7.5 (Китай), а для нагнетания воздуха применялся вентилятор ВМ-6М. Размещение оборудования и тип использованных вентиляционных трубопроводов представлены на рисунках 2.12 и 2.13.



Рисунок 2.12 — Исследуемая выработка с организацией системы вентиляции



Рисунок 2.13 — Всасывающий вентилятор FBD-7.5 для проветривания исследуемой выработки

Регистраторы изменения параметров температуры рудничного воздуха размещались в двух точках исследуемой выработки:

1. На внешней задней части кабины машиниста комбайна (рисунок 2.14, оранжевый график);

2. На расстоянии 30 метров от стрелы проходческо-очистного комбайна в сторону устья выработки, с размещением на стенке выработки (рисунок 2.14, голубой график).

Графики, полученные в период проведения эксперимента, представлены на рисунке 2.14.

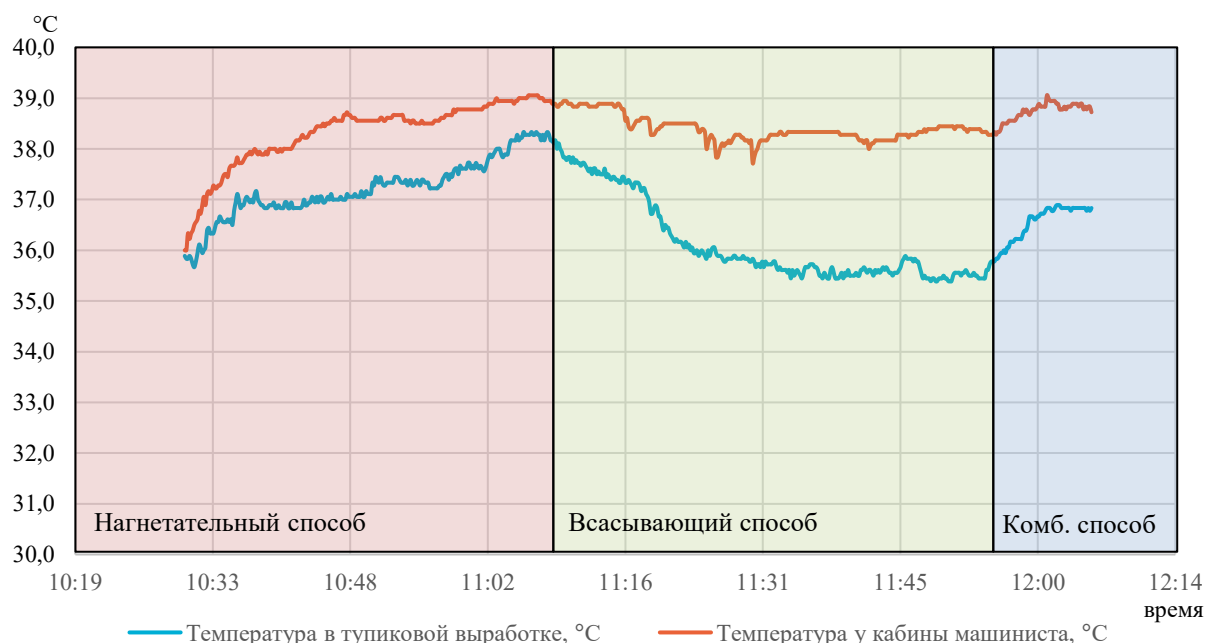


Рисунок 2.14 — Тренды изменения показаний температуры в исследуемой выработке

Анализ полученных результатов показал, что наиболее благоприятная температурная ситуация фиксируется при всасывающем способе проветривания тупиковой выработки. Температура рудничного воздуха в выработке при переходе с нагнетательного на всасывающий способ снижается на величину 3,5 °C.

График датчика, размещенного на кабине машиниста, не показал такой эффективности, какую показал датчик, размещенный на удалении от комбайнового комплекса. Вероятно, это связано с тем, что поверхность добычного оборудования оказывала значительное влияние на параметры температуры и не успела охладиться за период проведения эксперимента. Максимальные колебания зафиксированы в период изменения способов проветривания, в то время как в установившихся режимах проветривания величина отклонения имела минимальные значения.

Рассматривая комбинированный способ проветривания, стоит отметить, что основным условием являлось преобладание всасывающего вентилятора местного проветривания. Это связано с тем, что при таком условии достигается эффект снижения запыленности в тупиковой выработке [20, 118]. По результатам измерений видно, что эффект снижения температуры на рабочем месте присутствует, но выражается в

значительно меньшей степени. Это объясняется тем, что при комбинированном способе проветривания лишь часть воздуха подается по нагнетательному вентиляционному трубопроводу, который нагревается при взаимодействии с самим вентилятором. Другая часть воздуха в призабойное пространство поступает непосредственно по выработке. Смешение двух этих потоков в забое приводит к незначительному снижению температуры воздуха. Величина снижения, относительно нагнетательного способа проветривания, составила порядка 0,5 °С.

### **Выводы по главе**

На основании проведенных натуральных исследований установлено, что микроклиматические условия в тупиковых выработках Гремячинского ГОК формируются под влиянием совокупности факторов: тепловыделения от оборудования, теплообмена с породным массивом и оборудования системы местного проветривания. По результатам экспериментальных измерений можно сформировать основные выводы:

- Средняя величина естественной температуры нетронутого породного массива на исследуемом руднике составила 33,5 °С, а величина геотермического градиента – 0,0227 °С/м.
- Наиболее значимым источником тепловыделений являются комбайны и самоходные вагоны, температура поверхностей которых может превышать 65 °С.
- Поверхность пульта управления комбайном является важным фактором, формирующим температурный режим внутри замкнутого пространства кабины комбайна. Температура ее поверхности может достигать 50 °С.
- При использовании нагнетательного способа проветривания приращение температуры на выходе из вентиляционного трубопровода может достигать 7 °С.
- При использовании всасывающего способа проветривания величина снижения температуры воздуха в призабойном пространстве достигала 3,5 °С по сравнению с нагнетательным способом.
- Динамические параметры рудничной атмосферы позволили зафиксировать температурную динамику в течение рабочего цикла: пиковые значения температуры устойчиво совпадают с моментами работы горного оборудования. Самоходные вагоны вносят кратковременный вклад в повышение температуры при простое рядом с точками измерения. Полученные результаты позволяют обоснованно использовать их в качестве исходных данных при моделировании аэродинамических и тепловых процессов в призабойном пространстве, а также при проектировании систем нормализации микроклиматических параметров.

### **3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБСТАНОВКИ В ПРИЗАБОЙНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Для калийных месторождений, расположенных на территории Российской Федерации, характерна камерная система разработки. Разрушение породного массива осуществляется при помощи проходческо-очистных комплексов, которые состоят из горного комбайна, самоходного вагона и иногда самоходного бункера-перегрузателя. Описанное оборудование является высокопроизводительным и оснащено мощными электрическими приводами. Проветривание тупиковых выработок осуществляется осевыми вентиляторами местного проветривания, которые тоже работают от электрического привода. Таким образом, на формирование микроклиматических параметров тупиковой выработки оказывает значительное влияние оборудование, оснащенное электродвигателями. Помимо техногенных факторов, формирующих микроклимат, в рассматриваемом вопросе не стоит упускать породный массив, имеющий также высокую температуру, ввиду глубины его залегания. В данном разделе рассмотрены подходы к моделированию температурного режима на рабочем месте машиниста комбайна с учетом факторов, оказывающих влияние на формирование микроклимата в тупиковой комбайновой выработке калийного рудника. В качестве основных факторов приняты следующие источники тепловыделения: проходческо-очистной комбайн, самоходный вагон, система вентиляции тупиковой выработки, породный массив.

В данной главе речь пойдет о выборе и обосновании оптимального подхода к решению задач по расчету температурных и скоростных полей на рабочем месте машиниста комбайна. Задача решается с целью разработки технических решений по нормализации температурных параметров на рабочем месте машиниста комбайна. В связи с этим важной частью исследования является расчет требуемых параметров и условий работы охлаждающего оборудования.

Предлагаемый подход к моделированию заключается в разработке синтезированной модели, которая сводится к комплексному расчету задачи в одномерной и трехмерной постановках (рисунок 3.1).

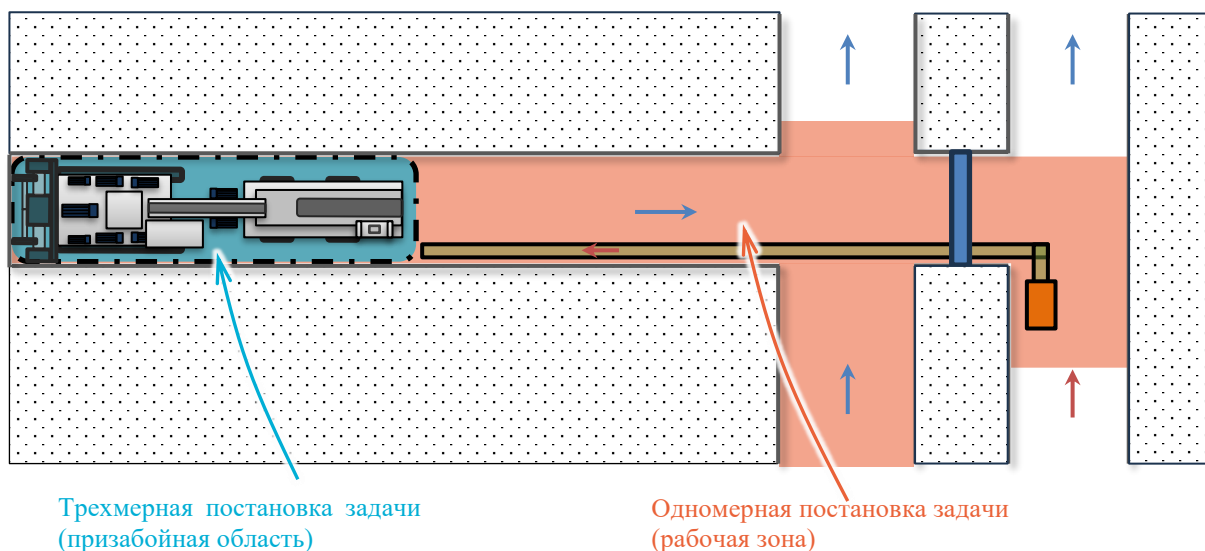


Рисунок 3.1 – Графическое изображение принципа разработки синтезированной модели для моделирования тепловых процессов

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 замеров, для этого необходимо разработать синтезированную модель в одномерной и трехмерной постановках задачи. Одномерная постановка задачи позволит рассчитать граничные условия для трехмерного моделирования при известном температурном градиенте месторождения и параметрах предполагаемого к использованию вентилятора местного проветривания.

### 3.1 Одномерная постановка задачи

Одномерная постановка задачи применяется в случае, когда отсутствует возможность проведения серии натурных измерений для определения граничных условий к трехмерному CFD моделированию. Суть подхода заключается в разработке одномерной математической модели «породный массив – рудничная атмосфера – стенка вентиляционного трубопровода», которая также способна учитывать тепловыделения от техногенных источников и лучистый теплообмен. Стоит отметить, что это уникальный в своем роде подход, учитывающий при решении теплофизических задач лучистый теплообмен между стенками трубопровода и рудничным воздухом [49,110].

Исследование [49], авторы которого применяли аналогичный подход при постановке одномерной задачи, рассматривает типовую схему расположения вентиляционного оборудования. В условиях ведения горных работ на исследуемом

руднике схема проветривания тупиковых выработок не организуется по типовым подходам. Под типовым подходом понимается ситуация, когда вентилятор местного проветривания располагается вблизи устья тупиковой выработки на свежей струе. Ввиду особенностей систем разработок эксплуатирующая организация зачастую вынуждена располагать ВМП за пределом блоковых выработок и на значительном расстоянии от устья тупиковой выработки. Условная схема описанной ситуации и графическая постановка одномерной задачи представлена на рисунке 3.2.

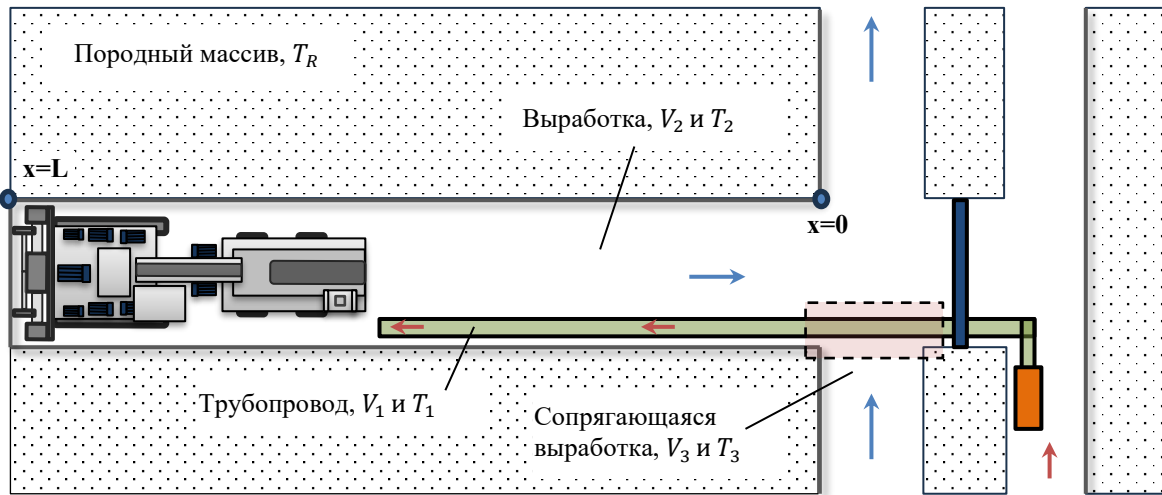


Рисунок 3.2 – Графическая постановка одномерной задачи

Особенностью описанной схемы является область пересечения вентиляционным трубопроводом сопрягающейся выработки, которая выделена на рисунке 3.2 красной зоной. Для данной области характерен дополнительный теплообмен с потоком воздуха сопрягающейся выработки, предлагаемый учет которого будет описан далее.

Для анализа процессов, происходящих в рабочей зоне, использована математическая модель теплораспределения в тупиковой выработке. Модель позволяет анализировать изменение температурных параметров воздушных потоков в тупиковой выработке и внутри вентиляционного трубопровода. Принятый подход позволяет учитывать основные механизмы передачи тепла: конвекцию, теплопроводность и лучистый теплообмен.

Теплоперенос внутри вентиляционного трубопровода описывается одномерным уравнением конвективного переноса теплоты с учетом теплообмена между воздушным потоком и внутренней поверхностью вентиляционного трубопровода, а также распределенных по длине тепловыделений:

$$G_1 c \frac{\partial T_1}{\partial x} = (T_{wo} - T_1) k_{wi} \pi + q(x), \quad (3.1)$$

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/(м<sup>2</sup>·°C);  $q(x)$  – удельная тепловая нагрузка, Вт/м.

Левая часть уравнения описывает перенос теплоты воздушным потоком вдоль вентиляционного трубопровода. Правая часть уравнения описывает тепловой поток от стенки трубопровода и возможные дополнительные тепловыделения.

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

$$G_2 c \frac{\partial T_2}{\partial x} = (T_{wo} - T_2) a_{wo} P_{wo} + (T_R - T_2) a_R P_R + q(x), \quad (3.2)$$

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/(м<sup>2</sup>·°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/(м<sup>2</sup>·°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 тепла породным массивом, что особенно важно при анализе длительных режимов проветривания и оценки тепловой инерции горных выработок:

$$\rho c \frac{\partial T_r}{\partial t} = \lambda_R \left( \frac{\partial^2 T_r}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_r}{\partial r} \right), \quad (3.3)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $\lambda_R$  – теплопроводность породного массива, Вт/(м·°C);  $r$  – радиус выработки, м.

Связь между тепловыми потоками учитывается через уравнения теплового баланса:

$$q_1 = q_2 + q_3, \quad (3.4)$$

где  $q_1$  – тепловой поток от воздуха в трубопроводе:

$$q_1 = (T_{wo} - T_1) k_{wi} \pi, \quad (3.5)$$

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

$$q_2 = (T_2 - T_{wo}) a_{wo} P_{wo}, \quad (3.6)$$

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

$$q_3 = \varepsilon C_0 P_{wo} \left[ \left( \frac{T_R + 273.15}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{R'} + 273.15}{100} \right)^4 \right], \quad (3.7)$$

где  $c_0 = 5,67 \text{ Вт/ (м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Реализация описанной математической модели и алгоритмов построения геометрии рассматриваемой области осуществлена в программе TES, разработанной специалистами Горного института Уральского отделения Российской академии наук [60].

Модель в одномерной постановке учитывает, что плотность, теплопроводность и удельная теплоемкость являются однородными параметрами. Скорости воздуха в трубе и выработке имеют однородное распределение и неизменны во времени. Температура воздуха внутри трубопровода однородная по всему поперечному сечению. При этом в модели имеются некоторые допущения:

- Рудничная атмосфера прозрачна для лучистого теплообмена;
- Влагообмен с водой на поверхностях выработки не учитывается;
- Химические реакции в модели не учитываются;
- Диффузионный перенос в воздухе не учитывается;
- Принимается отсутствие массопереноса в породном массиве.

Для настройки модели заданы исходные данные, перечень которых приведен в таблице 3.1. С целью настройки и валидации модели приняты данные, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований. Но стоит отметить, что перечень приведенных исходных данных возможно набрать без проведения натурных исследований, что актуально при разработке мероприятий для проектируемых участков.

Таблица 3.1 — Полученные результаты исследования теплофизических свойств сильвинита на руднике Гремячинского ГОК

Исследуемый параметр	Величина
Сечение исследуемой выработки	15,5 м <sup>2</sup>
Сечение вентиляционного става	0,45 м <sup>2</sup>
Температура перед ВМП	37,4 °С
Температура в воздуховоде сразу после ВМП	45,8 °С

Исследуемый параметр	Величина
Температура нетронутого породного массива	33,5 °С
Расход воздуха в выработке	4,0 м <sup>3</sup> /с
Барометрическое давление	111 900 Па
Плотность воздуха в выработке	1,25 кг/м <sup>3</sup>
Степень черноты вентиляционного става [47]	0,945
Степень черноты выработки [49]	0,960
Удельная теплоемкость породного массива	442,8 Дж/(кг·°С)
Теплопроводность породного массива	2,75 Вт/(м·°С)
Плотность породного массива	2,06 г/см <sup>3</sup>

При разработке технических решений для проектируемых участков, когда отсутствует возможность проведения замеров на ВМП, величину нагрева воздуха  $T_{\text{ВМП}}$  вентилятором местного проветривания можно рассчитать по формуле:

$$T_{\text{ВМП}} = 0,046N, \text{ °С}, \quad (3.8)$$

где  $N$  – мощность электродвигателя вентилятора местного проветривания. Коэффициент 0,046 °С/кВт показывает на сколько градусов 1 кВт мощности осевого вентилятора местного проветривания нагревает проходящий через него воздух. Данный коэффициент выведен по результатам проведения натурных исследований и описан в разделе с результатами натурных исследований системы вентиляции тупиковых выработок 2.3.

Как ранее было упомянуто, на рудниках применяются конфигурации, когда тракт трубопровода пересекает сопряжения с выработками, по которым также происходит движение воздуха (красная область на рисунке 3.2). Это создает дополнительные условия для теплообмена как с окружающим массивом, так и с воздухом сопрягающихся выработок.

Разработанная в рамках данного исследования математическая модель позволяет учитывать описанный процесс теплообмена, возникающий при прохождении воздушного потока через зону сопряжения выработок, в которой располагается вентиляционный трубопровод. Математически это реализовано следующим образом. Для расчета теплообмена при поперечном обтекании вентиляционного трубопровода

использовано критериальное уравнение для обтекания одиночного цилиндра. Число Нуссельта определяется следующим образом [74]:

$$Nu = 0,26Re^{0,6}Pr^{0,37}\varepsilon_r \text{ при } 10^3 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5, \quad (3.9)$$

$$Nu = \frac{a'_{wo}d}{\lambda}, \quad (3.10)$$

где  $d$  – наружный диаметр обтекаемого трубопровода, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·°С);  $a'_{wo}$  – коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании вентиляционного трубопровода воздушным потоком, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\varepsilon_r$  – поправочный множитель при поперечном обтекании.

При выполнении расчета теплообмена в зоне сопряжения слагаемое  $q_2$  в уравнении (3.4) видоизменяется для промежутка, обозначенного красной областью на рисунке 3.2, и выглядит следующим образом:

$$q'_2 = (T_3 - T_{wo})a'_{wo}P_{wo}, \quad (3.11)$$

где  $T_3$  – температура в сопрягающейся выработке, °С.

Таким образом, результаты моделирования температурных параметров в тупиковой горной выработке представлены в виде градиентной заливки, показывающей распределение поля температур в продольном разрезе (рисунок 3.3).

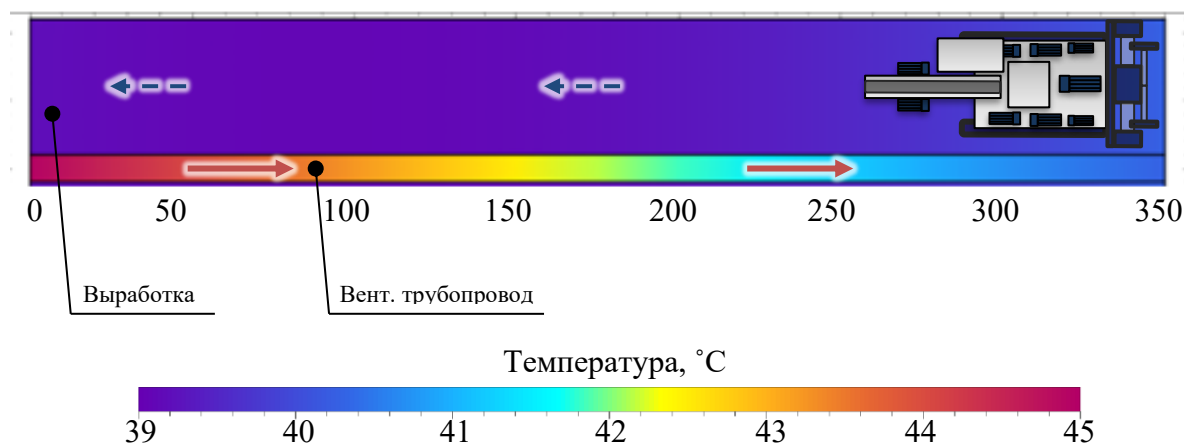


Рисунок 3.3 – Результаты расчета изменения температур в вентиляционном трубопроводе в одномерной постановке задачи

За нулевую отметку принимается место установки вентилятора местного проветривания, а конечная отметка – местоположение тупикового забоя. Начальная температура принимается в месте выхода потока из вентилятора местного проветривания. Количественные показатели изменения температуры в вентиляционном трубопроводе представлены в виде графика, изображенного на рисунке 3.4.

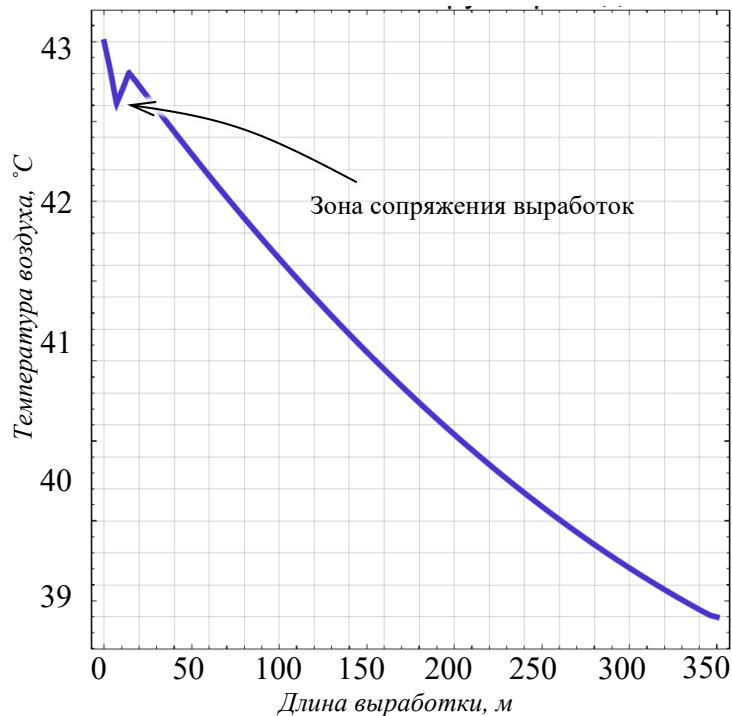


Рисунок 3.4 – Температура воздуха внутри вентиляционного трубопровода

Температурное поле вдоль выработки демонстрирует выраженный градиент. Значения температуры постепенно снижаются по мере удаления от места соединения вентиляционного трубопровода с ВМП к концу трубопровода. На выходе из вентилятора температура имеет значение 45 °С. Величина температуры на выходе из трубопровода составила 39,8 °С. Полученные результаты соответствуют результатам натурных исследований, представленных в главе 1. Таким образом, результаты численного моделирования в одномерной постановке задачи позволяют достоверно выполнять расчеты граничных условий для трехмерной гидродинамической модели. При отсутствии массива данных натурных измерений полученные значения температуры в исследуемой области можно использовать для верификации расчета в трехмерной постановке задачи.

### 3.2 Трехмерная стационарная постановка задачи

Расчет локальных систем охлаждения воздуха требует детальных результатов распределения температур и скоростей на рабочем месте машиниста комбайна. В виду этого необходима разработка трехмерной CFD модели тупиковой выработки и расчета протекающих в ней процессов. Для настройки модели необходимы 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.

### 3.2.1 Разработка геометрии модели

Важным элементом компьютерной модели является геометрия расчетной области. С одной стороны, данная геометрия для решения гидродинамической задачи должна быть достаточно детализированной, чтобы учесть характерные особенности ее влияния на движение воздушных потоков. С другой стороны, слишком сложная геометрия неминуемо приведет как к трудностям при построении сетки, так и к чрезвычайно высоким требованиям к вычислительным ресурсам. По этой причине в настоящей работе конструкции комбайна, бункера-перегрузателя и самоходного вагона упрощались таким образом, чтобы сохранить все крупные элементы, оказывающие влияние на динамику воздушного потока.

Для построения трехмерной гидродинамической модели принимается неполный участок тупиковой выработки длиной 50 м с площадью поперечного сечения  $15,5 \text{ м}^2$  (рисунок 3.5). Диаметр трубопровода принят равным 0,78 м, а его отставание от кабины машиниста комбайна – 10 м.

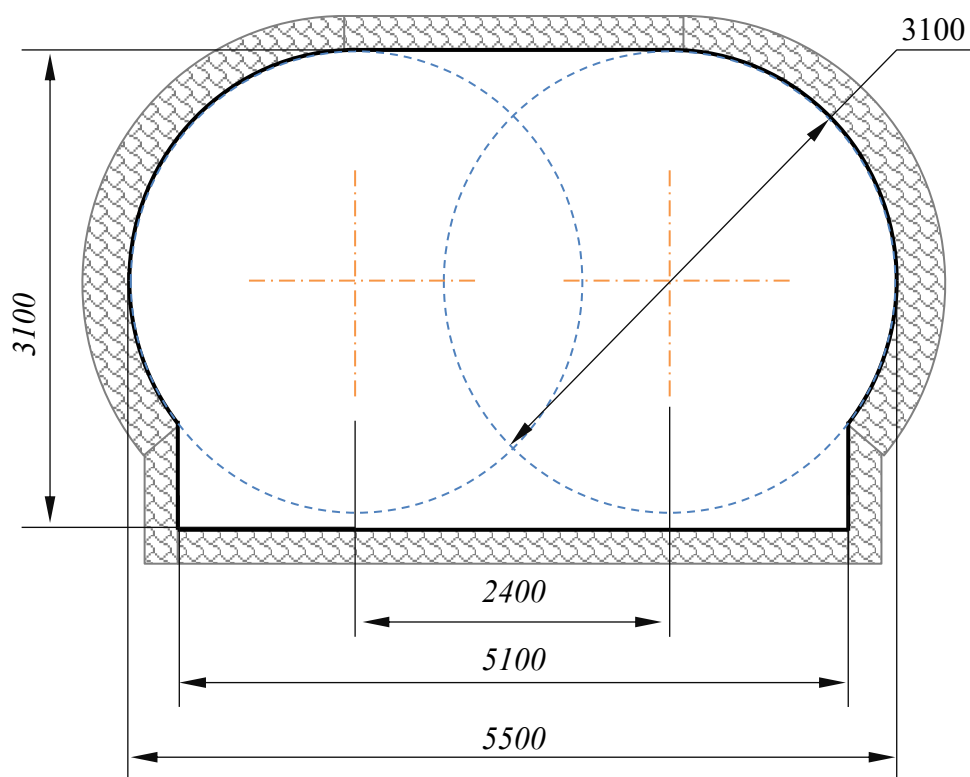


Рисунок 3.5 – Поперечное сечение выработки с ее геометрическими размерами

Построение геометрии проходческо-очистного комплекса выполнено в соответствии с чертежами, представленными в паспортных данных на соответствующий

вид оборудования. Моделирование исполнительного органа комбайна приведет к дополнительному усложнению модели, так как он находится непосредственно за щитом, а поскольку туда попадает минимальное количество воздуха, в геометрии данной областью можно пренебречь. Под упрощение также попали различные «выпирающие» части комбайна и мелкие зазоры, которые не влияют на глобальную картину течения.

Общий вид геометрии исследуемой области представлен на рисунке 3.6.

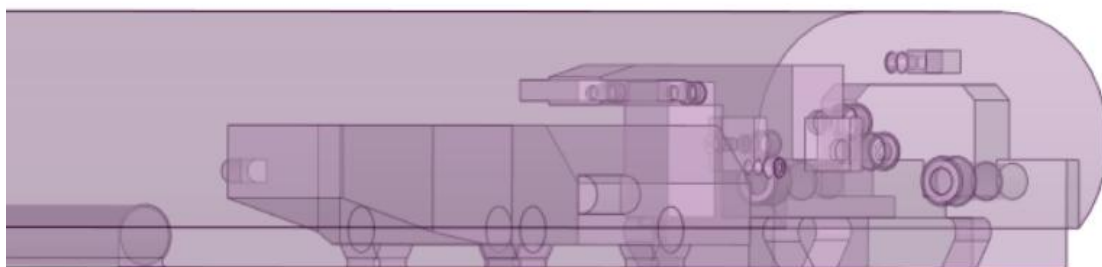


Рисунок 3.6 – Общий вид построенной геометрии исследуемой области

Построенная геометрия объектов, располагающихся в тупиковой выработке, была использована для настройки модели.

### 3.2.2 Математическая постановка задачи и определение граничных условий

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.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ \quad + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}), \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right], \end{array} \right. \quad (3.12)$$

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);  $\mu_t$  – турбулентная динамическая вязкость, Па·с;  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля;  $(\tau_{ij})_{eff}$  – эффективный тензор напряжений.

Описанная система уравнения (3.12) является незамкнутой, как следствие для решения симметричного тензора турбулентных напряжений необходимо еще шесть уравнений.

Решение данной задачи возможно при использовании физически обоснованной модели турбулентности. В CFD пакете Ansys большинство моделей основано на гипотезе Буссинеска. Суть данной идеи заключается в предположении линейной связи между тензором турбулентных напряжений  $\tau_{ij}$  и тензором деформаций  $S_{ij}$ :  $\tau_{ij} = -2\mu_t S_{ij}$ . Благодаря данной гипотезе разрешение системы уравнений сводится к нахождению турбулентной вязкости (скалярной величины) вместо шести компонент тензора напряжений.

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right), \quad (3.13)$$

где  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$  – эффективная динамическая вязкость, Па·с.

При разработке модели принята модель турбулентности Realizable  $k - \varepsilon$ . Выбор данной модели обусловлен предварительным сравнением ее с моделью SST  $k - \omega$ . Realizable  $k - \varepsilon$  показала лучшее значение по невязкам. Данная модель подходит для струйных течений, течений с разделением или умеренного завихрения [131].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b, \quad (3.15)$$

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad (3.16)$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (3.17)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p. \quad (3.18)$$

При этом турбулентная вязкость рассчитывается следующим образом:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3.19)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}, C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v'}{u'} \right|, \quad (3.20)$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}, \quad (3.21)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \quad \Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k, \quad (3.22)$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \varphi, \quad \varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad (3.23)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (3.24)$$

где  $k$  – турбулентная кинетическая энергия, Дж/кг;  $\varepsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии, Дж/кг;  $G_k$  – генерация турбулентной кинетической энергии за счет градиентов средней скорости, кг/(м·с<sup>2</sup>);  $G_b$  – генерация кинетической энергии за счет плавучести, кг/(м·с<sup>2</sup>);  $\eta$  – безразмерная характеристика локальной интенсивности турбулентности,  $W$  – безразмерная величина, характеризующая среднюю завихренность потока,  $\beta$  – коэффициент температурного расширения, К<sup>-1</sup>;  $v'$  – компонента скорости, параллельная вектору гравитации, м/с;  $u'$  – компонента скорости, перпендикулярная вектору гравитации, м/с;  $g$  – вертикальная компонента вектора гравитации, м/с<sup>2</sup>;  $\tilde{\Omega}_{ij}$  – тензор средних скоростей вращения, с<sup>-1</sup>;  $\omega_k$  – угловая скорость, с<sup>-1</sup>;  $\tilde{S}$  – тензор деформаций;  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_2 = 1.9$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.2$ ,  $A_s = 4.04$ .

Одним из требований при решении трехмерных гидродинамических задач является установление граничных условий, соответствующих процессам, зафиксированных при выполнении эксперимента. При построении модели были заданы следующие граничные условия:

- inlet – вход в расчетную область;
- outlet – выход из расчетной области;
- opening – свободная поверхность;
- wall – условие твердой стенки.

На почве, стенках выработки и трубопроводе установлены кинематические граничные условия, описывающие прилипание потока:

$$u_n|_{wall\ exc} = 0. \quad (3.25)$$

На входе в расчетную область установлено граничное условие типа velocity-inlet, с входным параметром, выведенным из расхода воздуха:

$$u_n|_{inlet} = 8.5 \frac{M}{c}. \quad (3.26)$$

Выход из расчетной области является граничным условием типа pressure-outlet, задается нулевое избыточное давление, при этом атмосферное давление – 101 кПа.

$$p_n|_{outlet} = 0 \text{ Па}. \quad (3.27)$$

На рисунке 3.7 представлены граничные условия относительно разработанной геометрии исследуемой области.

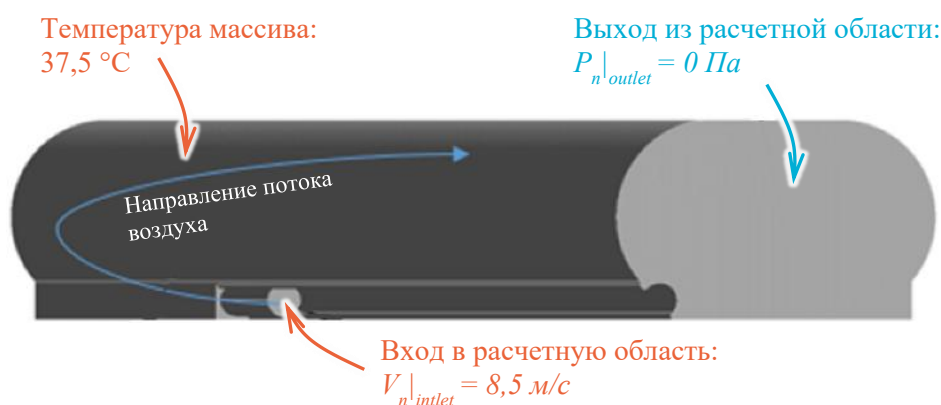


Рисунок 3.7 – Определение граничных условий

Граничные условия температуры массива с учетом прогрева от работы добычного оборудования заданы на поверхности стенки по результатам замеров, выполненных в ходе эксперимента.

$$T_n|_{wall\ exc} = 37.5 \text{ °C}. \quad (3.28)$$

Отдельные граничные условия вида moving wall заданы для электрических двигателей проходческо-очистного комбайна. Данные элементы являются основными источниками нагрева и оснащены системой воздушного охлаждения. Средняя скорость воздуха на выходе из системы охлаждения электроприводов составляет 5 м/с. Скорость на стенках подбиралась таким образом (рисунок 3.8), чтобы обеспечить необходимые температуры около кабины машиниста и сопоставлялась с указанной средней скоростью.

$$u_n|_{wall\ engine} = 30 \frac{M}{c}. \quad (3.29)$$

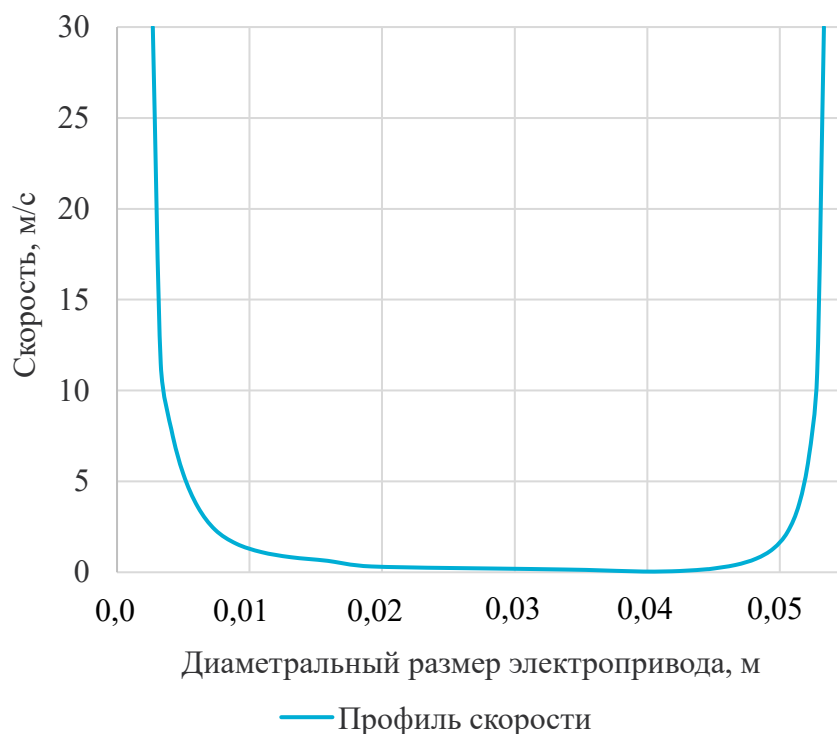


Рисунок 3.8 – Профиль скорости в двигателе

На стенках двигателей заданы граничные условия первого рода по температуре таким образом, чтобы обеспечить требуемые температуры у кабины машиниста комбайна.

Так как в данной модели появилось больше кинематических граничных условий, учитывающих вязкость воздуха вблизи стенок, стоит определиться с описанием потока на этих границах. Realizable  $k - \varepsilon$  относится к высокорейнольдсовым моделям турбулентности, которые не предназначены для определения влияния вязкости в ламинарном подслое. Для связки решения в ядре потока с пристеночным логарифмическим профилем скорости использованы полуэмпирические пристеночные функции. Справедливость использования пристеночных функций связана с тем, что они основаны на экспериментально подтвержденных законах: линейном в ламинарном подслое и логарифмическом. Поэтому можно пренебречь решением уравнений Рейнольдса в этих областях, что значительно повышает скорость решения. Вместо стандартной пристеночной функции будет использоваться функция Менстера–Лехнера, в которой учитываются шероховатости стенок добавлением в уравнение переноса кинетической энергии турбулентности источника, учитывающего пристеночные эффекты [84].

### 3.2.3 Исследование сеточной сходимости

В процессе численного решения гидродинамической задачи система уравнений Навье – Стокса преобразуется в дискретную систему алгебраических уравнений для отдельных ячеек. В данном случае применялся метод контрольных объемов. Пример разбиения исследуемой области на тетраэдры с применением призм в качестве пограничного слоя, представлен на рисунке 3.9.

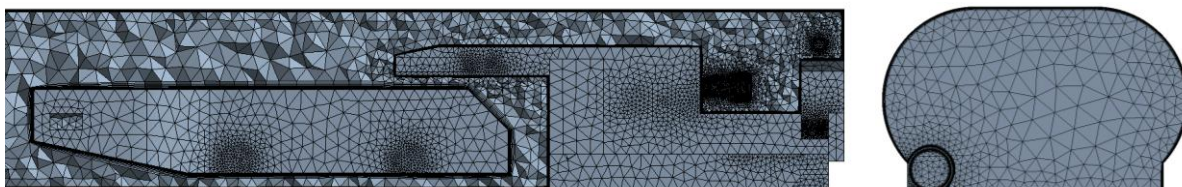


Рисунок 3.9 – Общий вид построенной геометрии исследуемой области

Для выполнения качественных расчетов необходимо выполнить исследование сеточной сходимости настраиваемой модели. Исследование сеточной сходимости – это нахождение оптимальных размеров расчетной сетки с наименьшим количеством элементов, дальнейшее измельчение которых существенным образом не влияет на полученное решение. Ключевые характеристики, по которым оценивалась сеточная сходимость: температура вблизи кабины машиниста комбайна и средняя скорость в исследуемых точках выработки. Для проверки независимости решения от расчетной сетки проводится несколько предварительных расчетов на расчетных сетках с различной плотностью элементов. Результаты сеточной сходимости представлены в виде графиков на рисунке 3.10.

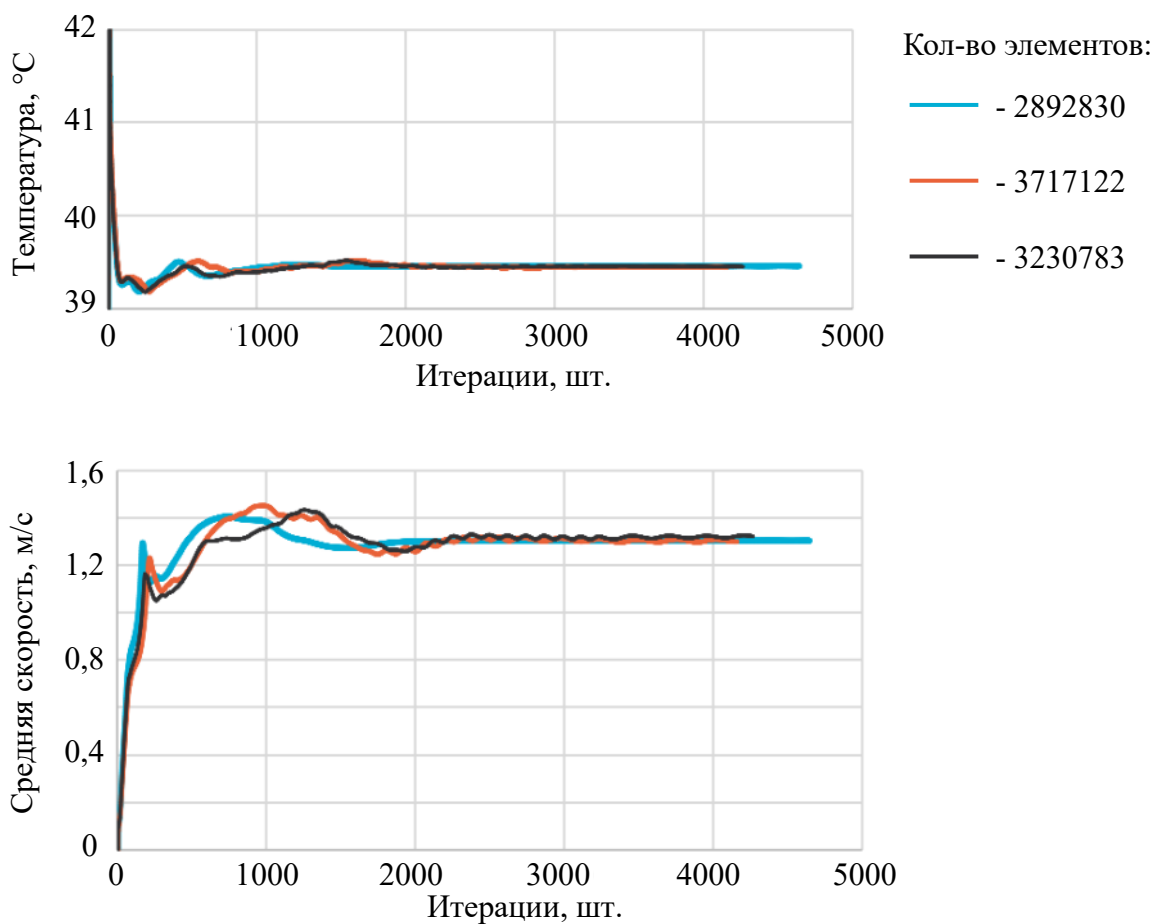


Рисунок 3.10 – Анализ сеточной сходимости

По представленным данным можно сделать вывод, что минимальная представленная сетка удовлетворяет всем условиям и ее можно использовать для дальнейших вычислений, последующее сгущение сетки не дает существенного различия в значениях ключевых характеристик, но и существенно увеличивает время получения численного решения.

Одним из важных параметров, позволяющих оценивать качество построенной расчетной сетки, является параметр  $y^+$ . Данный параметр представляет собой безразмерное расстояние от стенки исследуемой области до первого центроида ближайшего пристеночного элемента. На рисунке 3.11 представлен модельный параметр  $y^+$  для нагнетательного способа проветривания.

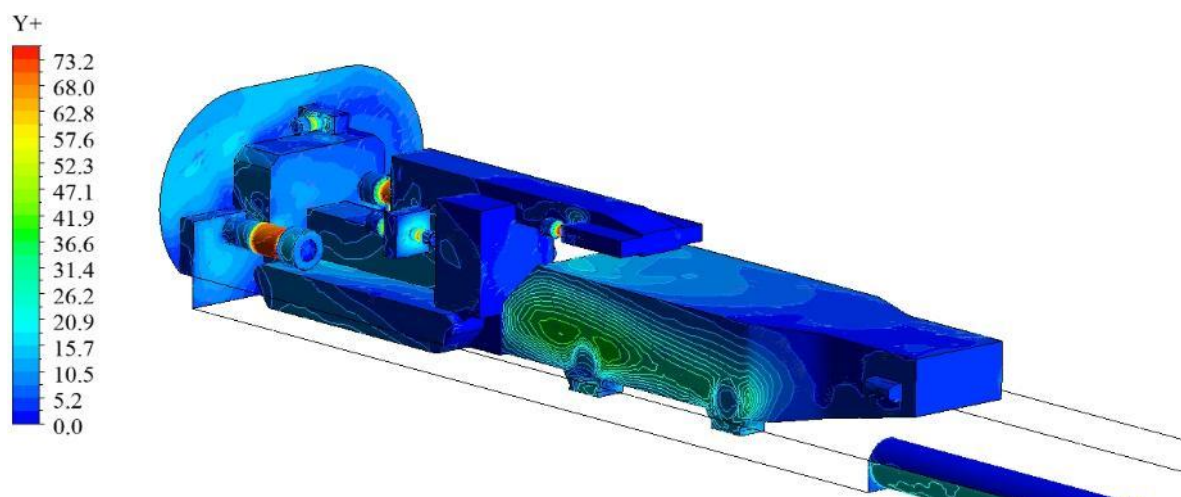


Рисунок 3.11 – Параметр  $y^+$  на стенках добычного оборудования при нагнетательном способе проветривания

Для семейства моделей  $k - \varepsilon$  данный параметр имеет ограничение  $30 \leq y^+ \leq 300$ . Применение масштабируемой пристеночной функции упрощает ограничение до  $y^+ \leq 300$ . Для выполнения этого условия необходимо не меньше 10 слоев призматических элементов с размером первого элемента не более  $2 \cdot 10^{-3}$  м.

При настройке модели необходимо задать турбулентное число Прандтля. Это безразмерный параметр, являющийся отношением турбулентной диффузии импульса к турбулентной диффузии тепла. Принято считать, что среднее турбулентное число Прандтля для воздуха равняется 0,85. Но при данном значении не удалось достичь параметров, зафиксированных при проведении эксперимента. Снижение числа Прандтля до значения равного 0,7, что является минимально допустимым для газов [99], помогло получить сошедшее решение.

Пробный результат моделирования показали, что в тупиковой выработке формируется сложная структура турбулентного движения потока.

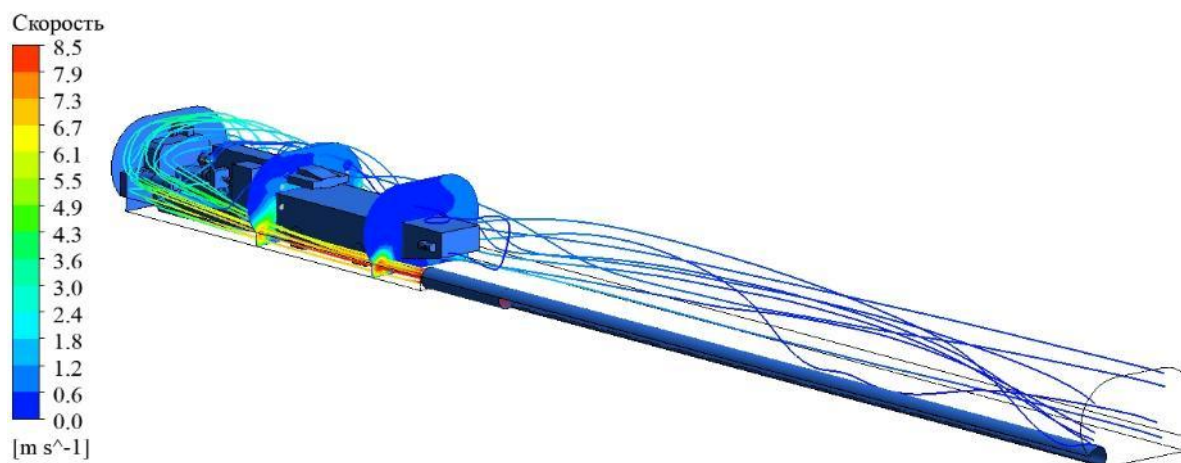


Рисунок 3.12 – Результат моделирования нагнетательного способа проветривания

Движение потока воздуха характеризуется сложным вихрем в призабойном пространстве, а также в зоне перегруза, расположенного у разгрузочной стрелы комбайна. Часть потока попадает обратно в область трубопровода, происходит перемешивание и более интенсивный поток разворачивает эту часть обратно в сторону забоя.

### 3.2.4 Валидация разработанной модели

Параметризация модели производилась согласно результатам натурных замеров, представленных в главе 1. 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.

В процессе параметризации были рассмотрены два стационарных положения оборудования в тупиковой выработке: вагон в забое и отсутствие вагона у комбайнового комплекса. В таблицах 2.4 - 2.6 представлены серии измерений, согласно которым производилась валидация.

Для определения зависимости скорости от высоты выработки были введены прямые на равном удалении от оси симметрии поперечного сечения выработки. В виду сильной пространственной неоднородности поля скорости, которая имела место как в рамках натурального 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 этим линиям выводились зависимости скорости от высоты выработки, на полученную зависимость накладывались

экспериментальные значения. На рисунках 3.13 и 3.14 представлены сравнения значений, полученных в ходе эксперимента, и результаты расчета настроенной модели.

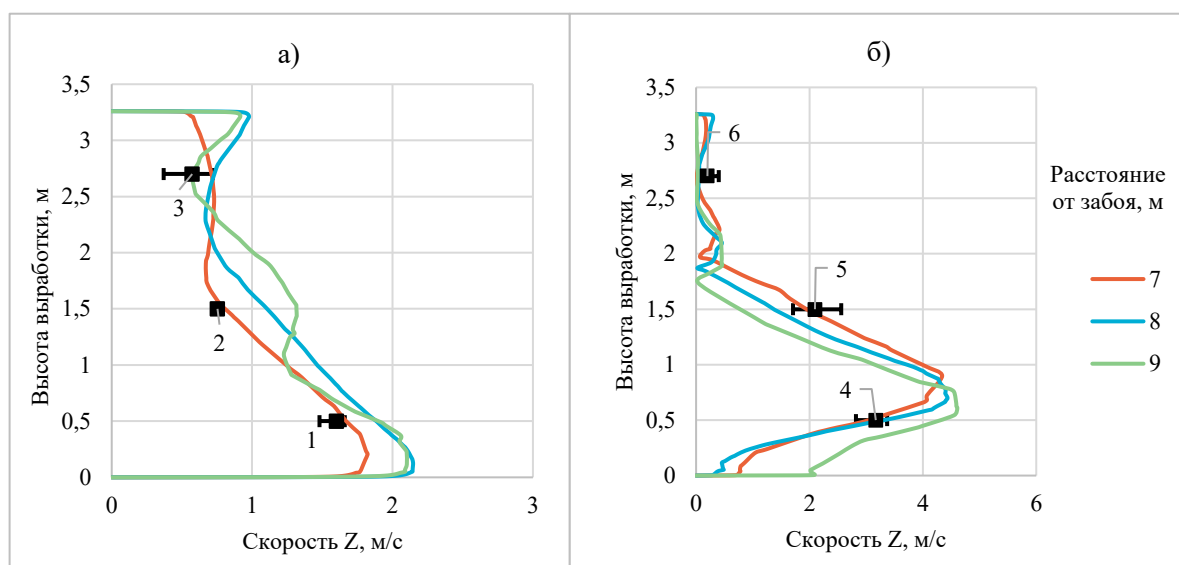


Рисунок 3.13 – Сравнительный анализ модельных профилей значений скоростей воздуха с точечными результатами натуральных исследований в варианте с вагоном:  
 а) правая сторона комбайна; б) левая сторона комбайна

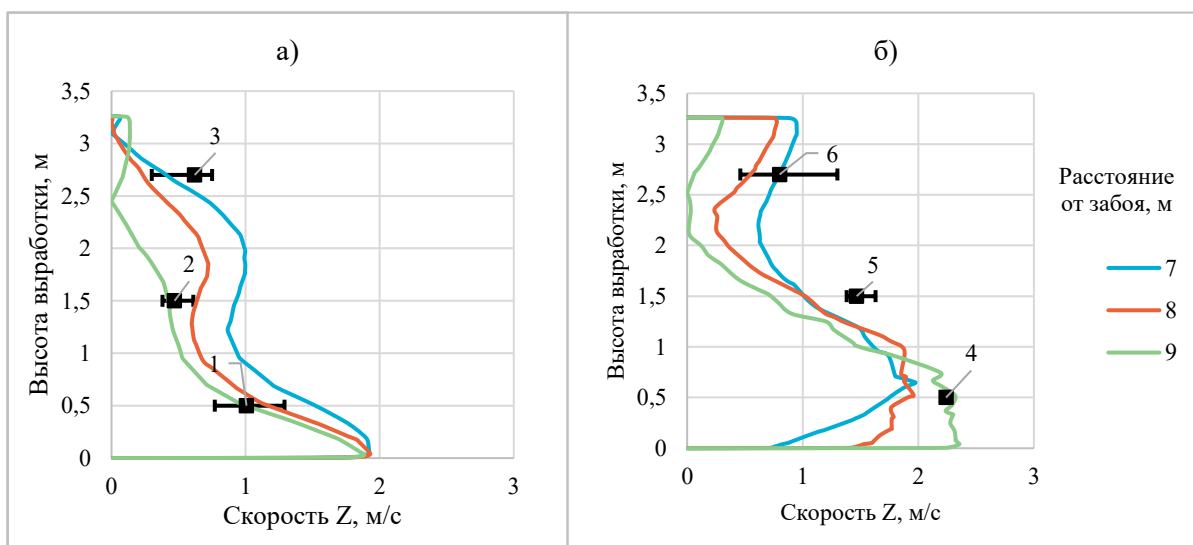


Рисунок 3.14 - Сравнительный анализ модельных профилей значений скоростей воздуха с точечными результатами натуральных исследований в варианте без вагона:  
 а) правая сторона комбайна; б) левая сторона комбайна

На модели удалось хорошо воспроизвести данные эксперимента для течения потоков воздуха в призабойном пространстве кабины. Совпадение имеет место как по средним скоростям, так и по общему восходящему тренду при перемещении от кровли к почве.

На рисунке 3.15 представлены контурные поля скорости по координате Z (координата вдоль выработки) и экспериментальные точки, наложенные на контурные поля. В данных точках вычислены средние значения скоростей.

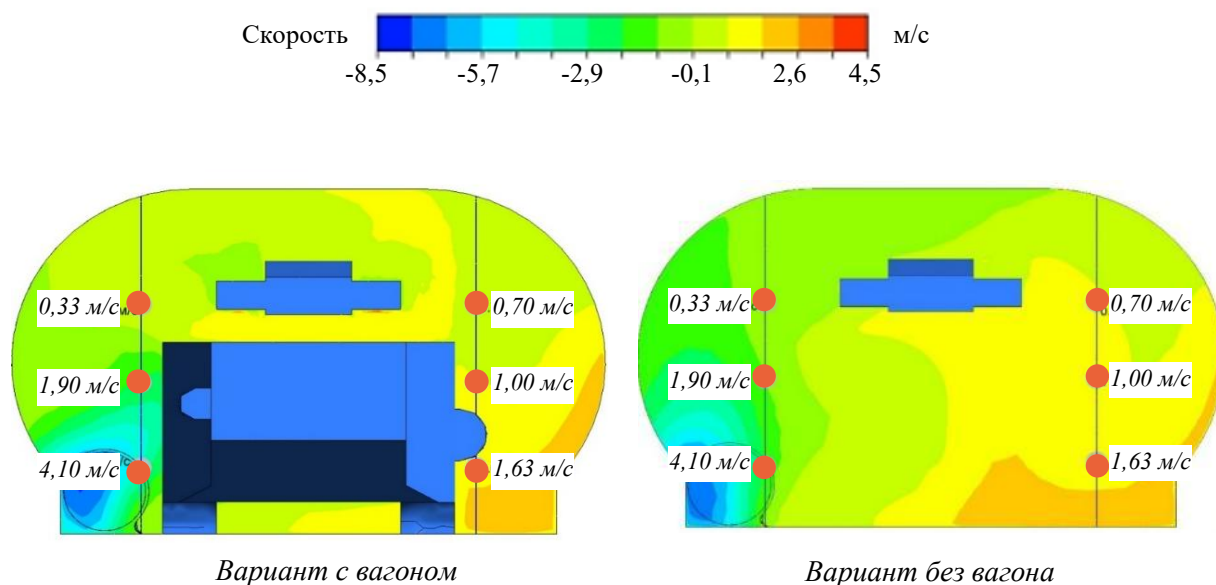


Рисунок 3.15 – Контурные поля скоростей в исследуемом сечении выработки при разных вариантах

При оценке интегральной погрешности использовались метрики MAE (Mean Absolute Error) и RMSE (Root Mean Squared Error). Текущие подходы основаны на суммировании ошибок (расхождений между модельными и экспериментальными величинами) по отдельным точкам. Данные показатели удобно использовать для проверки на сходимость численной модели и эксперимента.

При вычислении абсолютной погрешности (MAE) и среднеквадратичного отклонения (RMSE) применяются выборки из средних значений по трем замерам экспериментальных точек и средних значений в точках на модели (рисунок 3.15). Расчет упомянутых параметров осуществлялся по формулам (3.30) и (3.31).

$$MAE = 100\% \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y_i^*}{y_i^*} \right|, \quad (3.30)$$

$$RMSE = 100\% \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - y_i^*}{y_i^*} \right)^2}. \quad (3.31)$$

Результаты расчетов значений ошибок для всех вариантов модели представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 — Результаты расчета ошибок MAE и RMSE

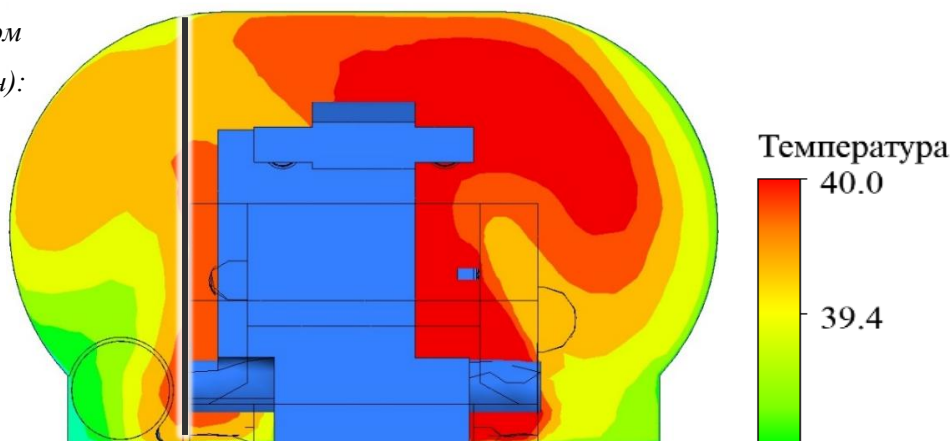
<b>Вариант модели</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE, %</b>
С вагоном	7 %	8 %
Без вагона	6 %	2 %

Средняя ошибка модели по скоростям не превышает 7%, среднеквадратичная ошибка не превышает 8%.

Валидация температурной зависимости производилась по экспериментальным измерениям временной динамики температуры в рабочей зоне машиниста согласно графику, представленному на рисунке 2.9. Суть такой валидации заключается в настройке изменения температурных полей при наличии самоходного вагона в призабойном пространстве и при его отсутствии. При этом, в момент движения самоходного вагона в сторону устья камеры комбайн отключался.

На рисунке 3.16 представлены контурные поля температур и линии, которые принимались для последующего построения зависимостей изменения температуры от высоты.

*Вариант с вагоном  
(комбайн запущен):*



*Вариант без вагона:  
(комбайн отключен):*

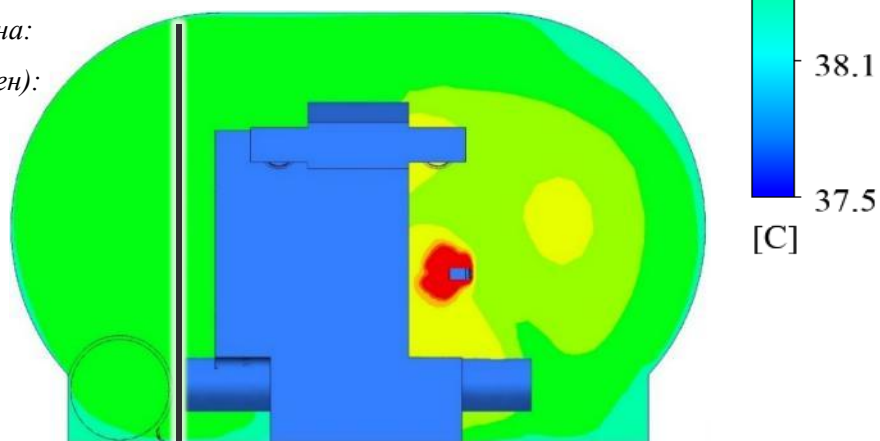


Рисунок 3.16 – Контурные поля температур, полученные при параметризации модели с вагоном у комбайнового комплекса и без вагона

Анализ результатов 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.

Таким образом, данная модель удовлетворительно описывает процесс неизотермического проветривания тупиковой выработки в ситуациях с работающим и выключенным комбайном. Модельные поля скоростей и температуры в атмосфере тупиковой выработки в целом соответствуют измеренным значениям в выбранных точках. Имеет место хорошее количественное соответствие между данными измерений и моделирования в целом (на уровне общих балансов массы и теплоты), а также модель хорошо прогнозирует общие тренды изменения скорости и температуры потока в пространстве тупиковой выработки. Текущая модель будет использована для выполнения многовариантных расчетов в трехмерной стационарной постановке.

### 3.2.5 Выполнение расчетов при нагнетательном способе проветривания

Разработанная параметризованная численная модель принята для выполнения оценочных расчетов тепломассопереноса при нагнетательном способе проветривания тупиковой выработки. В рассматриваемом сценарии вентиляционный трубопровод располагается со стороны кабины машиниста, с отставанием от кабины машиниста, равным 10 м. На рисунках 3.17 и 3.18 представлены результаты моделирования при разных способах проветривания тупиковой выработки.

*Нагнетательный способ:*

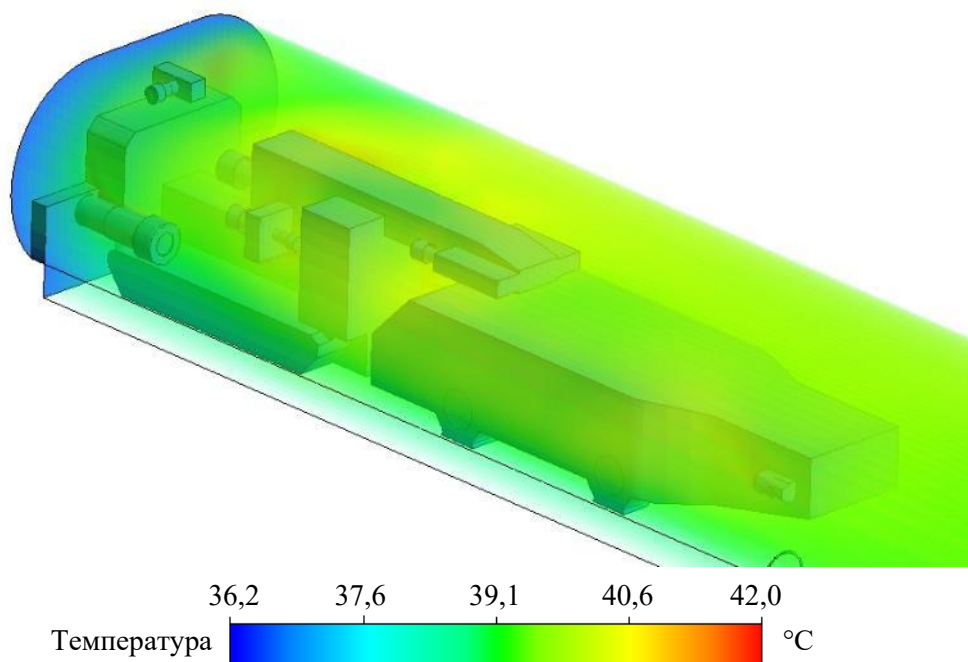


Рисунок 3.17 – Объемные поля температур при работающем комбайне с вагоном в призабойном пространстве

### *Нагнетательный способ:*

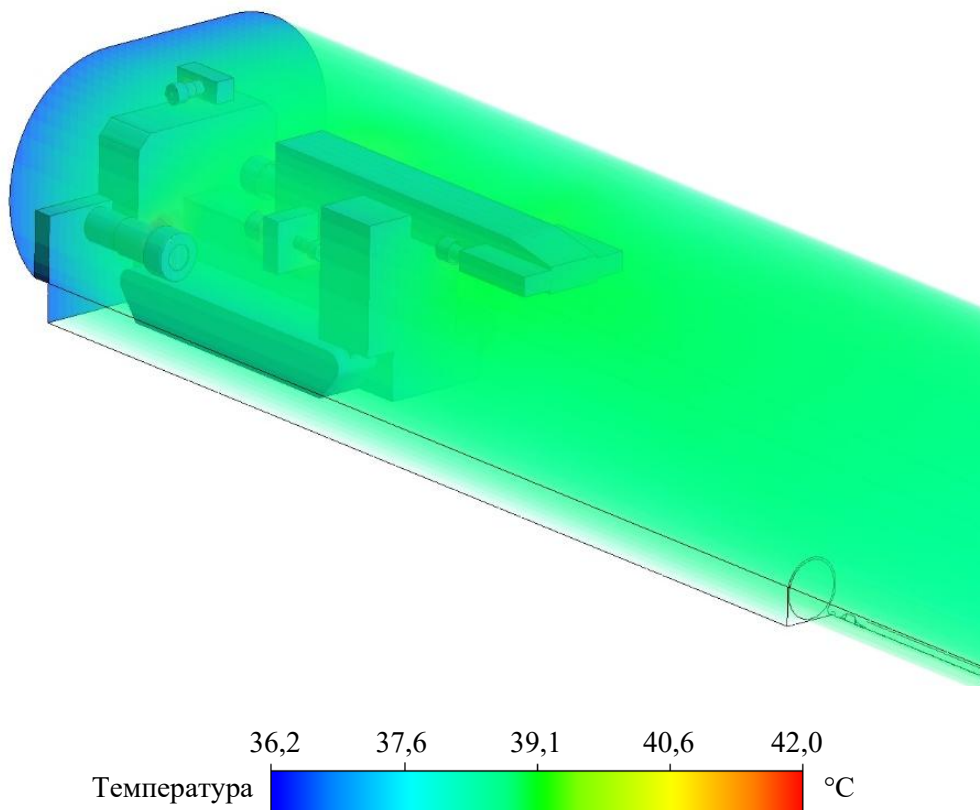


Рисунок 3.18 – Объемные поля температур при неработающем комбайне и без вагона в призабойном пространстве

Анализ результатов расчетов показал, что в обоих сценариях тепло рассеивается по всей исследуемой области. При этом фиксируются локальные места повышенных температур, которые располагаются близи электрических приводов.

### **3.3 Трехмерная нестационарная постановка задачи**

Полученные результаты одного из экспериментов, которые представлены в виде графиков на рисунке 2.9, показали, что температурный режим в тупиковой выработке непостоянен. При работе комбайна и наличии вагона в призабойном пространстве графики достигали своих пиковых значений. При отключении оборудования и удалении вагона к месту разгрузки температура уменьшалась. В связи с этим было принято решение проанализировать, какой из описанных факторов является наиболее значимым при формировании теплового режима: работа добычного комбайна или нагрев от самоходного вагона.

Решение данной задачи возможно при использовании нестационарного подхода, суть которого заключается в построении динамических сеток на ранее использованной трехмерной гидродинамической модели.

### 3.3.1 Корректировка модели под расчеты нестационарных процессов

Основой для построения модели с динамическими сетками являются результаты, описанные в разделе 3.2. Подход с динамическими сетками применен для анализа влияния движения самоходного вагона на распределение полей температур и скоростей воздуха. Максимальная скорость движения самоходного вагона принята согласно паспортным значениям [56]:

- скорость движения самоходного вагона с грузом – 8 км/ч (2,2 м/с);
- скорость движения самоходного вагона без груза – 9 км/ч (2,5 м/с).

При настройке модели учтено стартовое ускорение самоходного вагона. Анализ исследования [69] позволил принять условие, что самоходный вагон достигает постоянное значение величины скорости движения через 0,5 секунды после старта, без учета переключения ступени планетарного редуктора.

Деформация сетки осуществлялась с использованием комбинации методов сглаживания и повторного зацепления. Каждые два этапа численного расчета сетка перестраивалась вокруг движущегося самоходного вагона. При этом перестраивались только четырехгранные элементы рядом с движущимся объектом. Максимальная асимметрия ячеек была задана заранее для контроля желаемого качества сетки.

Для сглаживания деформирующейся сетки использовалось сглаживание по принципу «пружины». В этом методе края сетки между узлами обрабатываются как соединенные пружины с определенной жесткостью [107,84]. С целью определения мест деформации сетки в модели задается коэффициент, характеризующий свойства пружины – коэффициент упругости, величина которого составила 0,1. Чем ниже величина данного коэффициента, тем ближе к движущейся границе происходит деформация ячеек. Модель с динамическими сетками настроена таким образом, что она позволяет деформировать только тетраэдры, не затрагивая призматические элементы в пограничном слое.

Ячейки на пограничном слое самоходного вагона и на пограничном слое стенок выработки не деформировались и не перестраивались при проведении расчетов. Данные элементы перемещались с объектами как единое целое недеформируемое тело.

На рисунке 3.19 представлено вертикальное сечение, проходящее через центр самоходного вагона, показывающее реконструкцию динамических сеток в разные периоды времени.

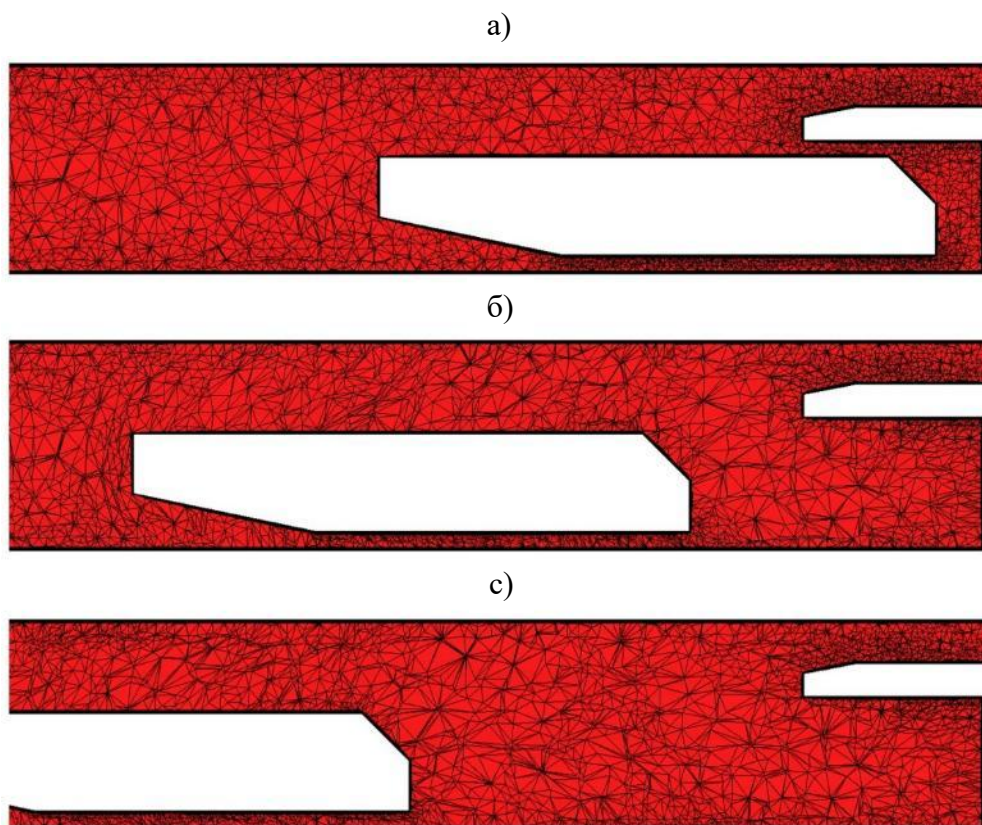


Рисунок 3.19 – Расчетная сетка конечного объема в разные моменты времени:  
*а) через 0 с; б) через 2 с; в) через 4 с*

Представленные иллюстрации (рисунок 3.19) демонстрируют, как реконструируется сетка в процессе расчета с сохранением приблизительного размера ячейки в зоне, освобожденной самоходным вагоном.

### 3.3.2 Оценочные расчеты при нестационарной постановке задачи

При выполнении расчетов анализируется влияние движения самоходного вагона на изменение параметров полей скоростей воздуха и температуры воздуха в призабойном пространстве.

#### **Влияние движения вагона на изменение поля скоростей в призабойном пространстве**

На рисунке 3.20 продемонстрировано изменение поля скоростей и температур при нагнетательном способе проветривания тупиковой выработки. Справа на рисунках представлена хвостовая часть комбайна, работающего на тупиковый забой, слева направление к устью выработки. Оборудование выделено белым цветом.

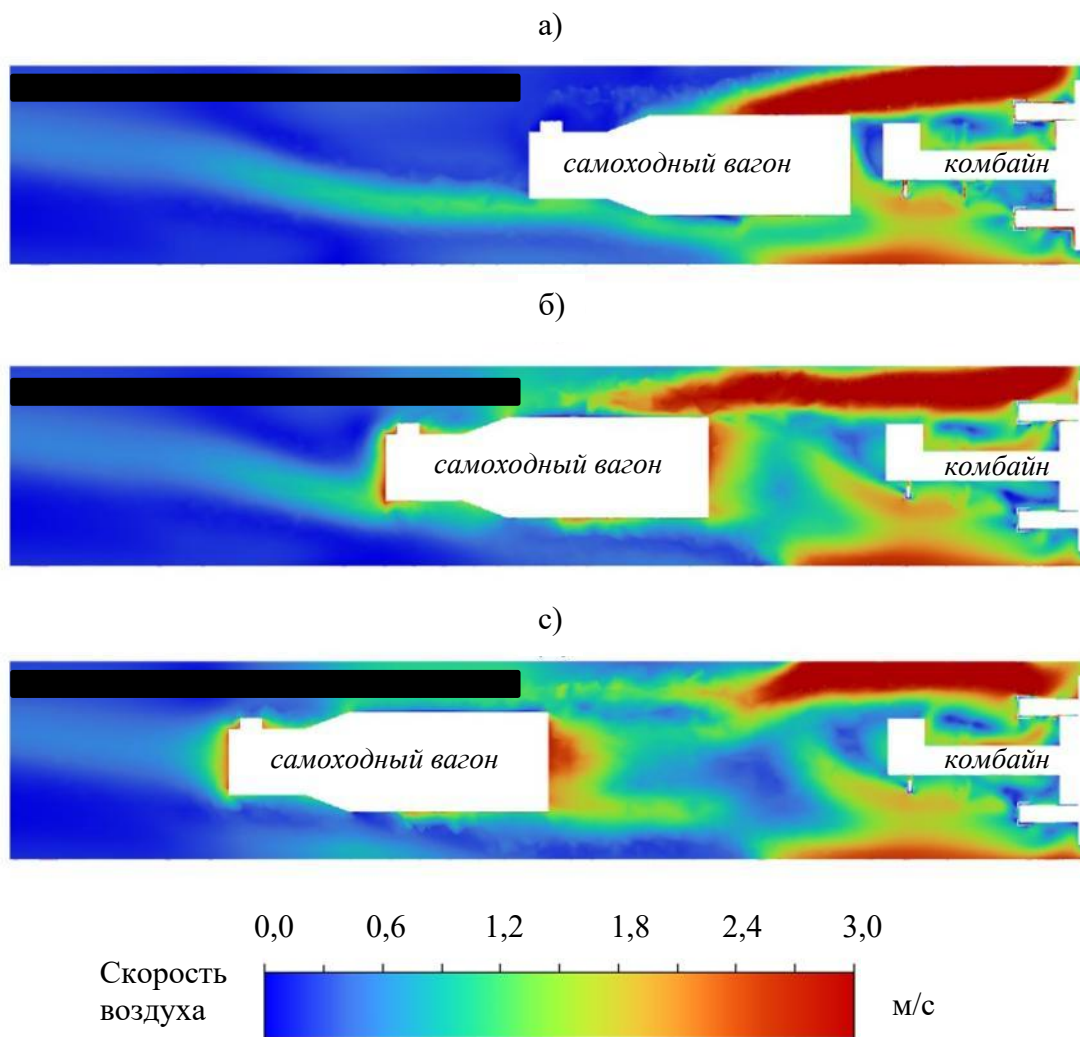


Рисунок 3.20 – Расчет изменения поля скоростей воздуха в горизонтальном сечении исследуемой выработки, проходящем через середину оборудования, в разные моменты времени (нагнетательный способ проветривания):

*а) через 0 с; б) через 2 с; в) через 4 с*

Анализируя результаты расчетов, можно сделать следующие выводы. При нагнетательном способе проветривания самоходный вагон играет роль своеобразного ограничителя при распространении воздушного потока. Вагон преграждает путь для поворота выходящей струи воздуха из нагнетательного става. В результате чего на рисунке 3.20 – б можно увидеть наиболее сформировавшийся вихрь, который распространяется от вентиляционной трубы практически до щита комбайна. Во всех рассматриваемых случаях отчетливо наблюдаются завихрения в призабойном пространстве и более равномерно выраженное течение воздуха за самоходным вагоном.

При рассмотрении вопроса влияния движения самоходного вагона на распределение поля скоростей в призабойном пространстве сделаны следующие выводы. Поле скоростей претерпевает значительные изменения по мере удаления самоходного вагона от проходческо-очистного комбайна. Перемещение самоходного

вагона вызывает кратковременные изменения формы крупномасштабного вихря, циркулирующего в тупиковой зоне, который создается высокоскоростной струей, выходящей из воздуховода.

### **Влияние движения вагона на изменение поля температур в призабойном пространстве**

Вторым шагом при решении задачи в нестационарной постановке выполнена оценка влияния движения самоходного вагона на изменение поля температур в зоне расположения проходческо-очистного комплекса, в условиях тупиковой выработки. На рисунке 3.21 представлены результаты расчета изменения параметров поля температур при нагнетательном способе проветривания.

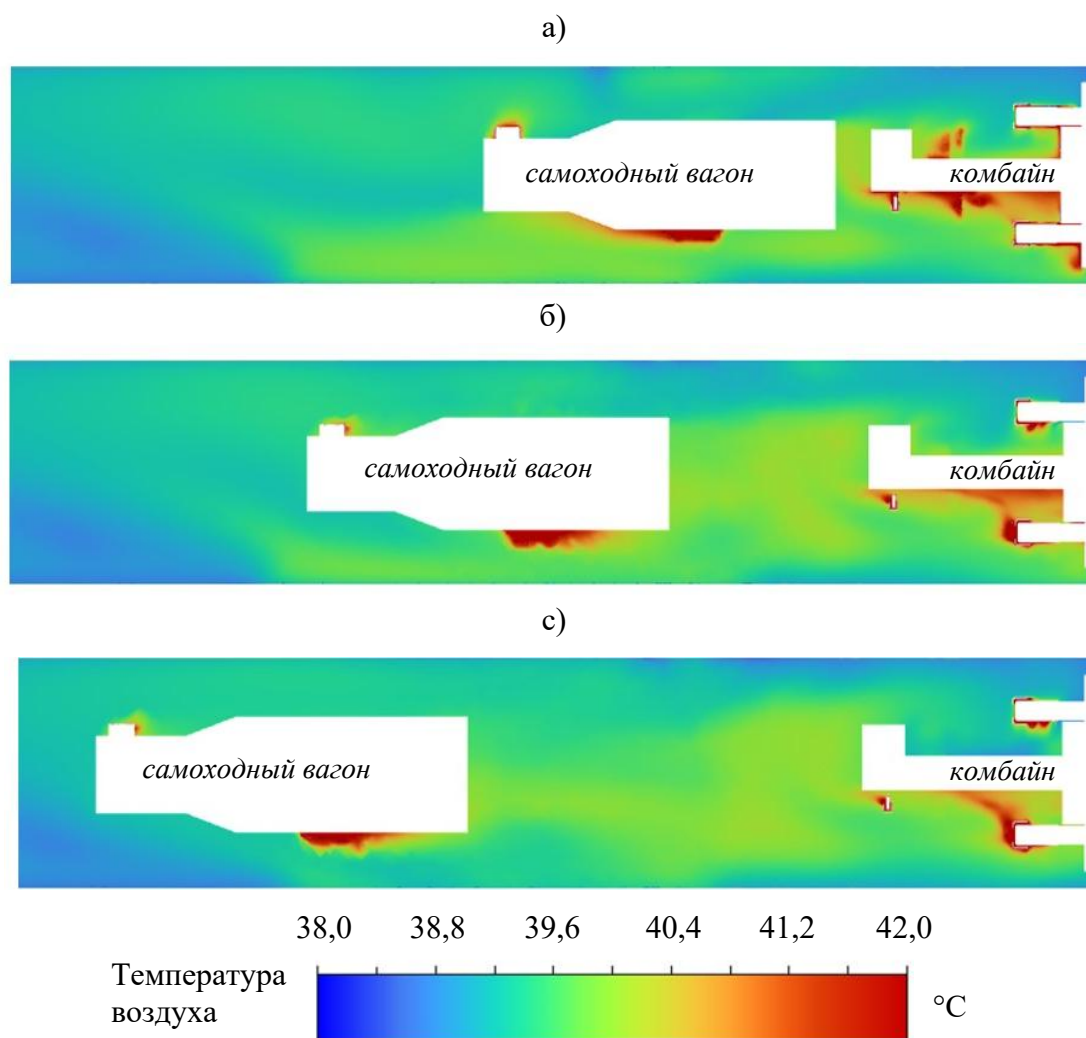


Рисунок 3.21 – Расчет изменения поля температур воздуха в горизонтальном сечении исследуемой выработки, проходящем через середину оборудования, в разные моменты времени (нагнетательный способ проветривания):  
а) через 0 с; б) через 2 с; в) через 4 с

Результаты расчета изменения параметров поля температур с течением времени при отдалении самоходного вагона показали, что вне зависимости от положения вагона параметры исследуемого поля температур остаются практически неизменными. Незначительные изменения фиксируются под стрелой-перегрузателем проходческо-очистного комбайна. Связаны данные изменения с тем, что при начале движения вагона происходит отключение приводов комбайна. Как следствие, модель фиксирует инертное остывание приводов скребкового конвейера на стреле.

Полученные результаты подтверждают предположение о том, что движение самоходного вагона, смоделированное с использованием динамических сеток, в первую очередь влияет на поле скоростей вблизи добычного комбайна. Напротив, изменения температуры на рабочем месте машиниста в основном обусловлены постепенным охлаждением электрических приводов после выключения комбайна.

Охлаждение горнодобывающего оборудования после остановки происходит по экспоненциальному закону [51]. Это можно физически интерпретировать двумя способами. Во-первых, известно, что теплопередача от однородного нагретого тела с теплоемкостью  $C$  к окружающему воздушному потоку регулируется эффективным коэффициентом теплопередачи,  $h$  [112].

$$C \frac{dT}{dt} = h(T_a - T), \quad (3.32)$$

где  $T$  – температура горного оборудования, °С;  $T_a$  – температура воздуха, °С;  $t$  – время, с.

Охлаждение воздушного пространства в тупиковой выработке после подачи холодного воздуха также происходит по экспоненциальному закону. Это следует из закона баланса масс, который в данном случае может быть выражен следующим образом. Объемный расход воздуха  $Qdt$  с температурой  $T_в$ , подаваемый в рабочую зону в течение времени  $dt$ , смешивается с нагретым воздухом, который имеет температуру  $T > T_в$  и занимает часть общего объема  $V$  (объем воздушного пространства в рабочей зоне). В результате средняя температура  $T$  уменьшается на  $dT$ . Следовательно, поступающий холодный воздух заменяет равный объем  $Qdt$  нагретого воздуха с новой средней температурой равной  $T - dT$ . В математической форме это можно записать следующим образом:

$$T_в Qdt + VT = V(T - dT) + Qdt(T - dT) \quad (3.33)$$

или

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q}{V}(T_в - T). \quad (3.34)$$

Решение уравнений (3.32) и (3.34) является экспоненциальной функцией.

Анализ результатов моделирования с динамическими сетками показал, что данный подход позволяет произвести оценку изменения структуры воздушного потока в тупиковой горной выработке. Но при этом влияние движения самоходного вагона на температурную обстановку на рабочем месте машиниста комбайна не зафиксировано.

### **Выводы по разделу**

Результаты исследований позволили выполнить анализ в части изучения аэродинамических и температурных параметров в призабойном пространстве тупиковой выработки калийного рудника с учетом влияния факторов, формирующих тепловой режим. На основе полученных результатов натурных замеров сформированы исходные данные для разработки синтезированной модели, что позволило обеспечить возможность всесторонней оценки процессов теплообмена на рабочем месте машиниста комбайна.

Предлагаемый подход к моделированию построен на принципах выбора расчетной ситуации. В первом случае рассматривается проектируемый участок шахтного поля, для которого невозможно выполнить анализ условий теплового режима путем выполнения экспериментальной части. В таком случае исходные данные рассчитываются в одномерной постановке задачи и в дальнейшем результаты используются в качестве граничных условий при трехмерной постановке задачи. Второй же случай подразумевает собой разработку решений по нормализации микроклиматических параметров в призабойном пространстве действующих горных выработок. Данный сценарий позволяет выполнить требуемый перечень экспериментальных исследований в условиях подземного рудника, которые в дальнейшем послужат исходными данными для трехмерной постановки задачи.

Переход к трёхмерной CFD-модели (на базе программного комплекса Ansys Fluent) позволяет обеспечить получение детализированных полей скоростей и температур. Данные параметры отражают реальную структуру воздушных потоков в тупиковой выработке с учетом геометрии выработки и используемого оборудования, чего невозможно получить при моделировании в одномерной постановке. Использование модели турбулентности Realizable  $k-\epsilon$  позволяет достичь устойчивого решения задач воздухораспределения в призабойном пространстве тупиковой выработки.

Валидация модели выполнена по результатам экспериментальных данных, полученных в ходе выполнения натурных исследований на подземном руднике Гремячинского ГОК. Модель адекватно воспроизводит как абсолютные значения, так и

полученные тренды, характеризующие изменения параметров в пространстве. Средние ошибки по скоростям не превышают величину 7%, что говорит о достаточной точности воспроизведения течения воздуха в исследуемой области.

Выполненные расчеты в трехмерной нестационарной постановке, основанные на подходе динамических сеток, продемонстрировали, что вне зависимости от положения вагона параметры исследуемого поля температур остаются практически неизменными. В то же время движение самоходного вагона существенно влияет на изменение структуры воздушного потока. Таким образом, доминирующим фактором при формировании техногенного источника тепла является непосредственно проходческо-очистной комбайн. Динамическое моделирование позволило сделать вывод, что температурная составляющая микроклимата определяется характеристиками оборудования, а не изменением аэродинамических параметров воздушного потока.

Полученная синтезированная модель адекватно повторяет результаты натурных исследований и является обоснованной для выполнения расчетов и разработки систем локальной нормализации тепловых параметров в призабойном пространстве. Результаты работ опубликованы в статье [101].

#### **4 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В ПРИЗАБОЙНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В УСЛОВИЯХ ВСАСЫВАЮЩЕГО СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ**

Результаты натурных исследований в части проведения опытно-промышленных испытаний всасывающего способа проветривания, представленные на рисунке 2.14, показали снижение температуры воздуха вблизи расположения проходческо-очистного комплекса. Локальные снижения температуры достигали величины 3 °С. Организация подачи свежего воздуха к призабойному пространству с пониженной температурой способствует улучшению теплового режима. Как следствие, исходные данные, используемые для разработки технических и организационных мероприятий, принимают более оптимальный вид, например, с точки зрения разницы температур, «до» и «после» охлаждения исследуемых областей. Полученные данные свидетельствуют о перспективности разработки технических средств охлаждения воздуха, основанных именно на всасывающем способе проветривания.

Для получения детальной картины теплового режима и распределения воздушных потоков в призабойном пространстве необходимо выполнить трехмерное CFD моделирование при условии всасывающего способа проветривания тупиковой выработки. Результаты моделирования позволят сформулировать постановку задачи в части разработки технических решений по локальному охлаждению воздуха, а также получить массив исходных данных для разработки систем охлаждения.

##### **4.1 Обоснование всасывающего способа проветривания**

Для решения задач в части расчета распределения температур и скоростей воздуха в призабойном пространстве в условиях всасывающего способа проветривания необходимо скорректировать граничные условия на ранее разработанной модели. Порядок разработки модели представлен в главе 3.

В первую очередь верифицированную и валидированную численную модель при расчетах с нагнетательным способом проветривания необходимо скорректировать под всасывающую схему проветривания. При всасывающем способе проветривания, в отличие от нагнетательного, свежий воздух подается непосредственно по самой выработке. Омыв забой, исходящий поток воздуха удаляется через всасывающий вентиляционный трубопровод на общие вентиляционные выработки. Схема проветривания приведена на рисунке 4.1

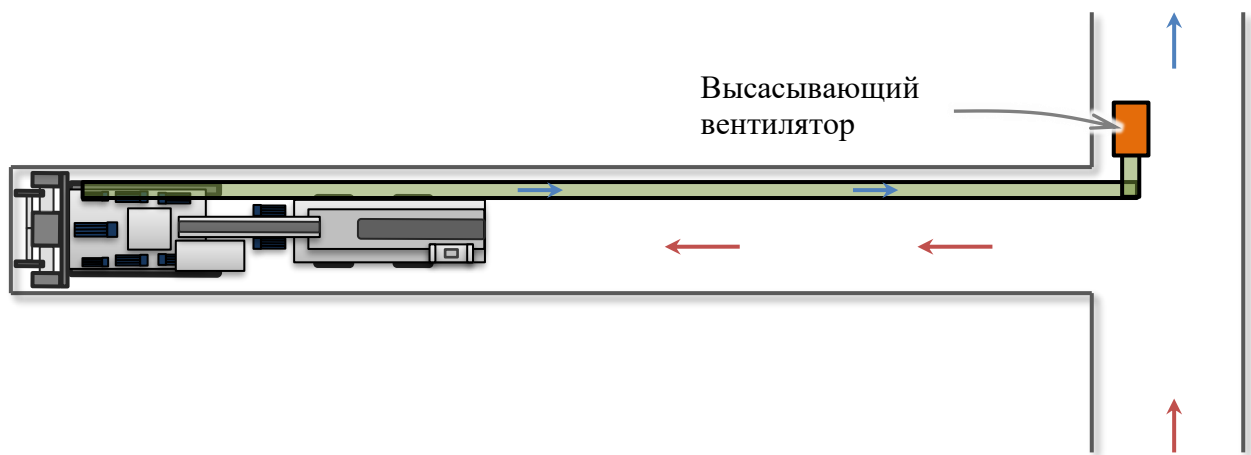


Рисунок 4.1 – Схема расположения оборудования при всасывающем способе проветривания

В сравнении с нагнетательным способом проветривания, вентиляционный трубопровод всасывающего вентилятора располагается вдоль противоположной стенки выработки. Диаметр вентиляционного трубопровода остается неизменным и равняется 0,78 м.

На объекте исследования разработано обоснование безопасности опасного производственного объекта, позволяющее эксплуатировать всасывающий способ проветривания тупиковых выработок. Основанием для данного способа стал пылевой фактор, подробнее о котором можно прочитать в разделе 1.2. Одним из требований при организации всасывающего способа является соблюдение величин отставания трубопровода от щита комбайна при различных расходах воздуха в выработке. С точки зрения моделирования распределения тепловых потоков в тупиковой выработке целесообразно принимать наибольшую обоснованную скорость движения воздуха в тупиковой выработке. Данное решение объясняется тем, что в последующем при расчетах систем локального охлаждения, выходящий воздух из воздухоохладителей быстрее уходит из рабочего пространства в сторону забоя выработки. Обосновать величину скорости воздуха возможно разработанным для исследуемого объекта обоснованием безопасности опасного производственного объекта, в части изменения способа проветривания тупиковой выработки. Таким образом, в ходе корректировки модели отставание трубопровода от щита комбайна принимается равным 2 м, а скорость движения воздуха в выработке – 0,4 м/с. Для более корректного сравнения данного способа расчет выполняется с тем же расходом воздуха, который использовался при моделировании нагнетательного способа проветривания.

Граничные условия параметризованы на предыдущей модели. Логичным решением было бы поменять местами вход и выход из расчетной области, однако этим решением можно пренебречь. 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, тем самым inlet и outlet зоны фактически меняются местами.

Результаты расчетов распределения полей температур представлены на рисунках 4.12 и 4.13. Стоит отметить, что для удобства анализа полученных результатов повторно вынесены ранее полученные итоги моделирования при нагнетательном способе проветривания.

*Всасывающий способ:*

*Нагнетательный способ:*

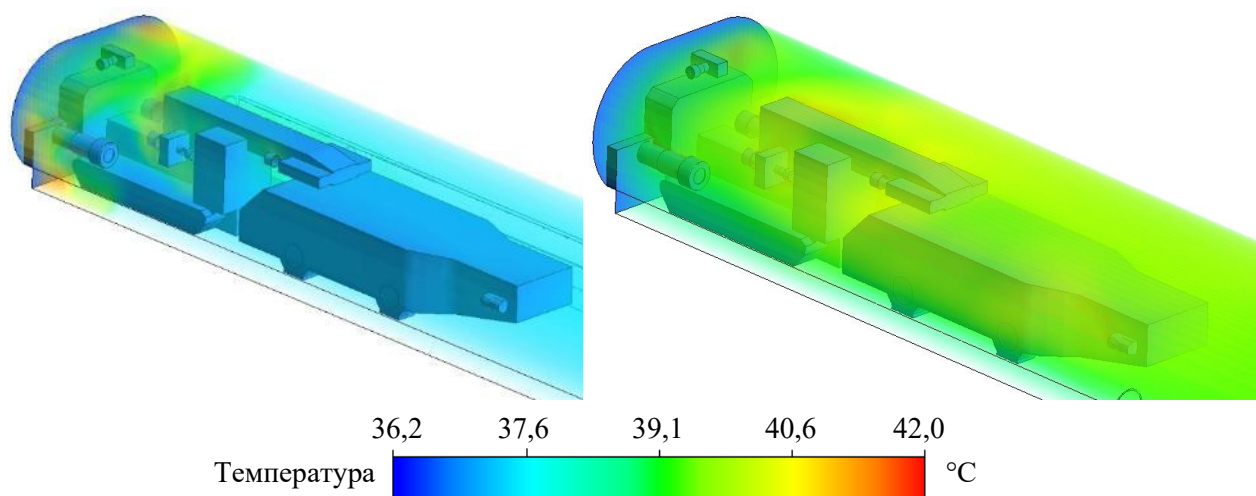


Рисунок 4.2 – Объемные поля температур при работающем комбайне с вагоном в призабойном пространстве

*Всасывающий способ:*

*Нагнетательный способ:*

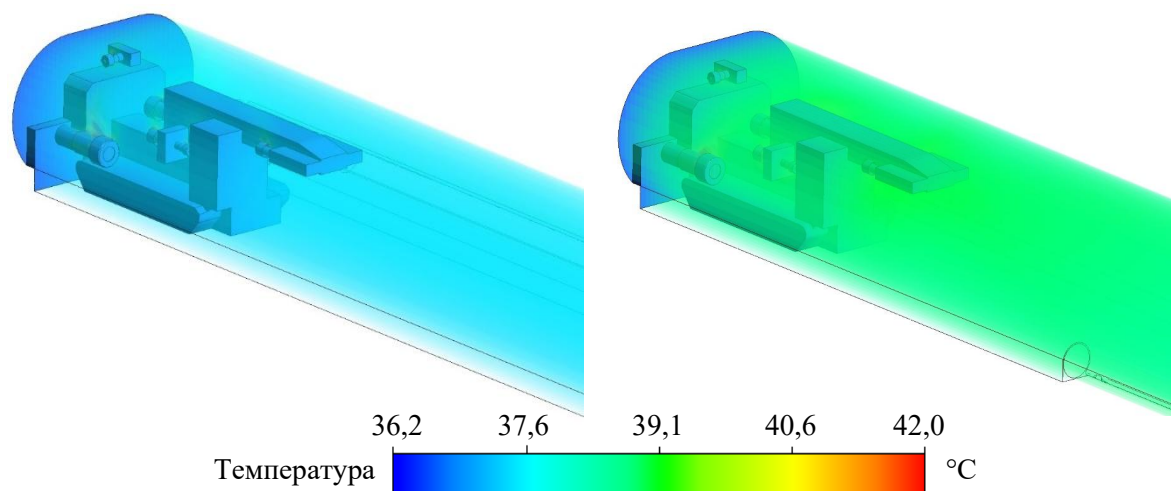


Рисунок 4.3 – Объемные поля температур при неработающем комбайне и без вагона в призабойном пространстве

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

$$T_{cp} = \frac{1}{V} \int T dV, \quad (4.1)$$

где  $V$  – объем исследуемой области (призабойное пространство 50 м от забоя),  $T$  – поле температур, полученное в результате численного моделирования.

Расчет данного параметра позволяет обобщенно охарактеризовать эффективность разных способов проветривания в условиях работающего комбайна с вагоном в выработке и неработающего комбайна без вагона в выработке. Результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Результаты расчета среднеобъемной температуры воздуха

Рассматриваемый сценарий	Среднеобъемная температура $T_{cp}$	
	Всасывающий способ	Нагнетательный способ
При работающем комбайне и с вагоном в призабойном пространстве	37,6 °С	39,3 °С
При неработающем комбайне без вагона в призабойном пространстве	37,1 °С	38,7 °С

Сравнительный анализ показал, что при нагнетательном способе проветривания в призабойном пространстве формируется протяженная зона повышенных температур, чего не наблюдается во втором варианте. Всасывающий способ проветривания характеризуется удалением теплого воздуха через вентиляционный трубопровод. При этом за счет более низкой температуры в устье по всей выработке наблюдается значительная разница в сравнении с нагнетательным способом. Диффузия при нагнетании воздуха не дает быстрой диссипации энергии, за счет чего воздушный поток охлаждается медленно по мере удаления к устью.

Для выполнения количественного анализа в части изменения температуры построены графики с изменениями температур по высоте по сечению (рисунок 4.4).

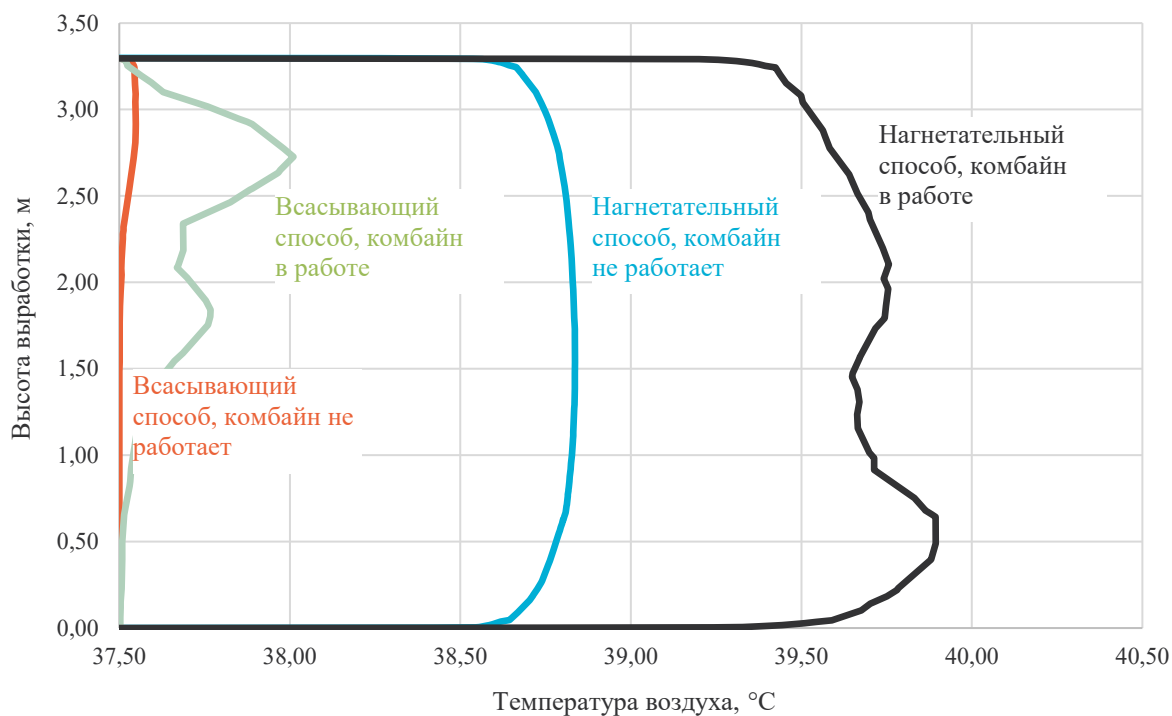


Рисунок 4.4 – Профили температуры для всех вариантов проветривания

Анализ графиков показывает, что применение всасывающего способа проветривания помогает снизить температуру в выработке минимум на 2 °C. На воздух действует эффект плавучести. Теплый воздух, имеющий меньшую плотность, естественным образом поднимается к кровле выработки. Это создает естественную конвекцию, способствующую дополнительному перемешиванию воздушных потоков.

В рамках работы рассмотрен вопрос изменения температуры воздуха в призабойном пространстве при разных длинах исследуемой тупиковой выработки. Максимальная длина тупиковой выработки принята равной 300 м, поскольку технология ведения горных работ на исследуемом объекте не предполагает эксплуатацию более длинных тупиковых выработок. При расчетах принимается, что комбайн находится в постоянной работе. Результаты расчетов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Результаты расчета температуры воздуха в зоне машиниста комбайна при разных длинах тупиковой выработки

Рассматриваемая длина выработки	Температура воздуха в зоне расположения кабины машиниста комбайна	
	Всасывающий способ	Нагнетательный способ
100 м	34,5 °C	43,9 °C
200 м	36,1 °C	42,5 °C
300 м	37,5 °C	41,3 °C

При всасывающем способе проветривания наблюдается увеличение температуры воздуха по мере роста длины выработки. Это обусловлено тем, что свежий воздух, поступающий в забой, проходит по всей длине выработки и постепенно нагревается за счет теплообмена с нагретым всасывающим вентиляционным трубопроводом, а также за счет теплообмена от работающего оборудования. При нагнетательном способе проветривания температура воздуха в призабойной зоне уменьшается с увеличением длины выработки. Это объясняется тем, что температура воздуха, на выходе из вентилятора местного проветривания превышает температуру горного массива. В процессе движения вентиляционной струи происходит интенсивный теплообмен с менее нагретым воздухом в тупиковой выработке. Как следствие, наблюдается снижение температуры воздуха в призабойном пространстве. Тем не менее, всасывающий способ проветривания в рассматриваемых условиях является более эффективным по фактору температурного режима в призабойном пространстве.

При рассмотрении данной задачи в нестационарной постановке появляется возможность оценить изменения полей скоростей и температур при движении самоходного вагона в условиях всасывающего способа проветривания.

На рисунке 4.5 представлены результаты изменения поля скоростей потоков воздуха при всасывающем способе проветривания тупиковой выработки. Представленный расчет рассматривает момент отъезда самоходного вагона с зоны погрузки комбайна в сторону устья выработки.

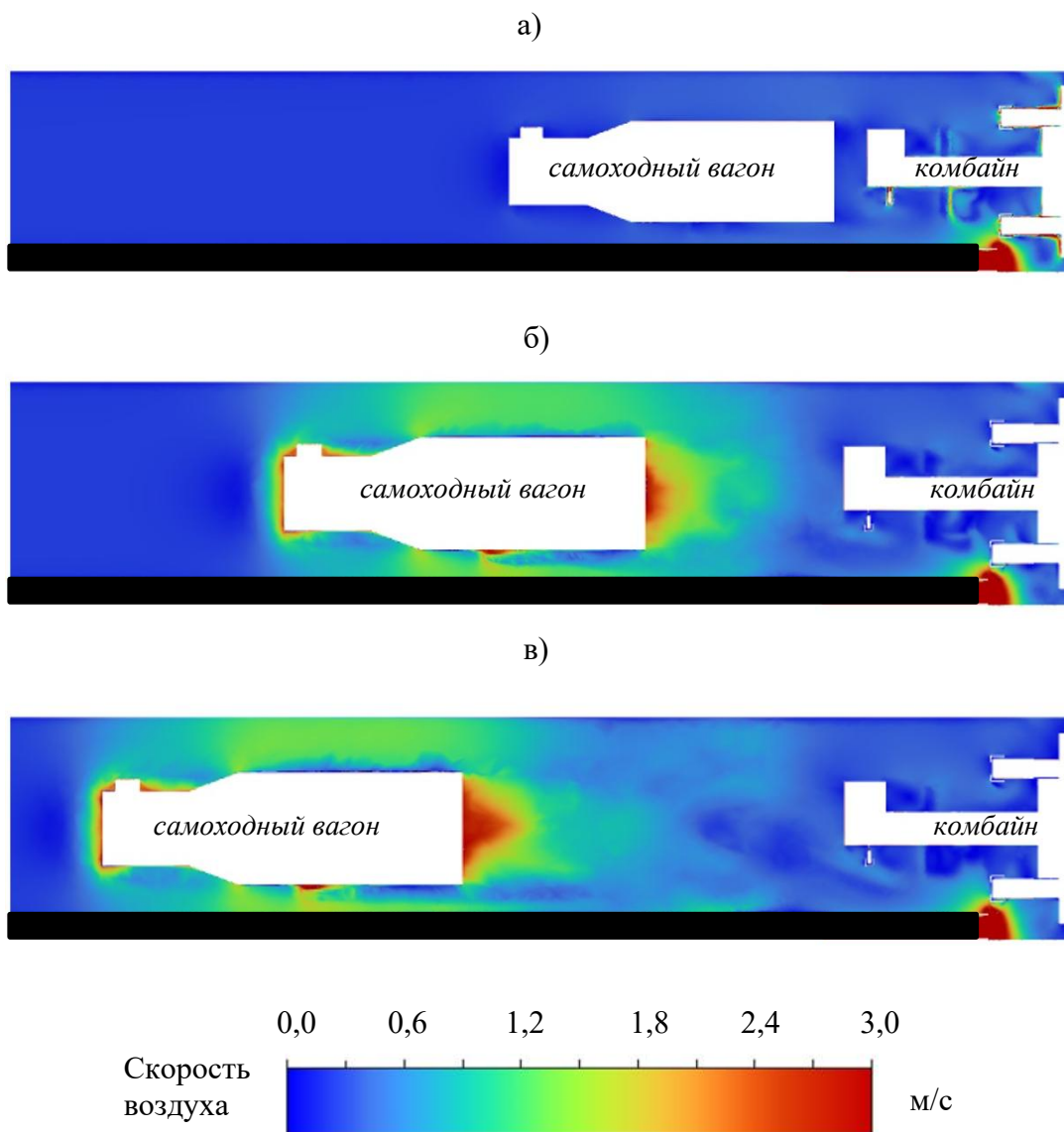


Рисунок 4.5 – Расчетные поля скоростей воздуха в горизонтальном сечении исследуемой выработки, проходящем через середину оборудования, в разные моменты времени (всасывающий способ проветривания):  
*а) через 0 с; б) через 2 с; в) через 4 с*

Анализ результатов распределения скоростей при всасывающем способе проветривания показал, что в тупиковой выработке наблюдается равномерное распределение потока воздуха. Наибольшие скорости фиксируются в зоне всаса вентиляционного трубопровода. Для всасывающего способа проветривания поле скоростей значительно изменяется, в первую очередь вблизи самого движущегося самоходного вагона, ввиду действия «поршневого эффекта» [94,103].

На рисунке 4.6 представлены результаты расчета изменения параметров поля температур призабойного пространства при всасывающем способе проветривания во время движения самоходного вагона.

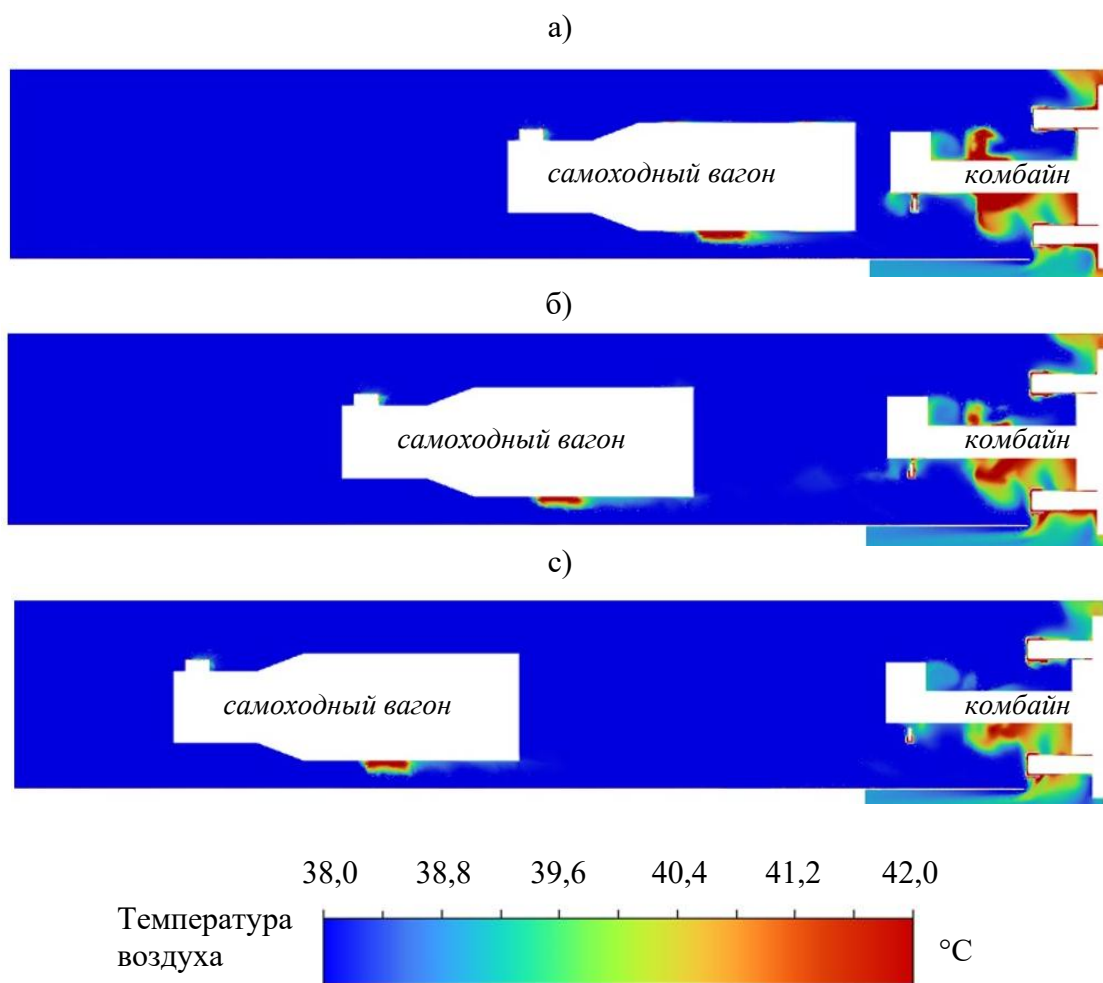


Рисунок 4.6 – Расчет поля температур воздуха в горизонтальном сечении исследуемой выработки, проходящем через середину оборудования, в разные моменты времени (всасывающий способ проветривания):  
*а) через 0 с; б) через 2 с; в) через 4 с*

Анализ результатов расчетов распределения температурных полей показал аналогичные результаты тем, которые получились при нагнетательном (рисунок 3.21) способе проветривания. Движение самоходного вагона не оказывает значительного влияния на изменение параметров поля температуры в призабойном пространстве.

Согласно результатам моделирования использование всасывающего способа проветривания тупиковой выработки является комплексным решением, которое позволяет обеспечить вентиляцию призабойного пространства и при этом эффективно управлять температурным режимом. В связи с этим целесообразно разработать систему локального кондиционирования воздуха, основанную на всасывающем способе проветривания.

## 4.2 Моделирование распределения температур при локальном охлаждении воздуха на основе всасывающего способа проветривания

Рассматривая разные подходы к выбору способов охлаждения рудничного воздуха, можно отметить, не всегда целесообразно охлаждать большую зону ограниченную одной или несколькими выработками. Зачастую достаточно создать комфортные и безопасные условия труда на рабочем месте горнорабочих. В связи с этим в данной главе представлены расчеты исходных данных для разработки системы локального кондиционирования, а также выполнено моделирование возможных технических решений. На рисунке 4.7 представлена область, которую необходимо охладить при решении задач данного исследования. Границы рассматриваемого участка выделены красным цветом. При этом внешняя часть границы проходит по контуру тупиковой выработки, пройденной одним ходом комбайна.

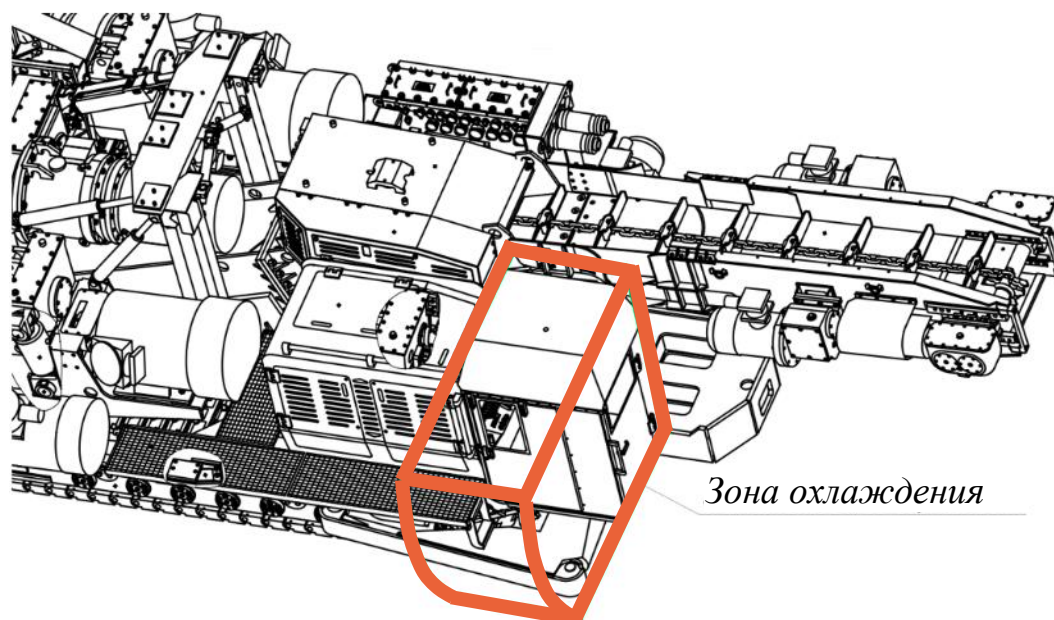


Рисунок 4.7 – Область, подлежащая локальному охлаждению (внутренняя часть кабины и прикабинное пространство) в условиях тупиковой комбайновой выработки

Исходные данные для выполнения расчетов приняты из реальных условий ведения горных работы на Гремячинском ГОК, которые зафиксированы при выполнении натурных замеров и представлены в главе 1. Моделирование производилось согласно требованиям документа СанПиН 2.2.4.3359–16 "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах" [59]. Безопасным перепадом температур для осуществления горнорабочими свою деятельность является величина равная 6 °С, при этом скорость движения воздуха на рабочем месте не должна превышать 0,5 м/с. Согласно существующему обоснованию безопасности в части превышения температур используемого на Гремячинском ГОК, максимально

допустимая температура установлена величиной 36 °С. Соответственно при зафиксированных в ходе экспериментов температурах не превышающих величину 40 °С охлаждение воздуха на 6 °С удовлетворяет требованиям документа.

Основной задачей в рамках данного этапа моделирования является рассмотрение ситуации подачи охлажденного воздуха в исследуемую область при всасывающем способе проветривания. На рисунке 4.8 можно увидеть, что при всасывающем способе проветривания вентиляционный трубопровод располагается со стороны противоположной кабине машиниста комбайна.



Рисунок 4.8 – Организация всасывающего способа проветривания в условиях рудника Гремячинского ГОК при проведении опытно-промышленных испытаний

Исходные данные, принятые для выполнения расчетов, идентичны ранее выполненной серии моделирования. Согласно исследованию [35], максимально допустимая величина отставания всасывающего трубопровода от щита комбайна составляет 2 м при соблюдении требования, что скорость воздуха в выработке не должна быть ниже, чем 0,4 м/с. С точки зрения изучения вопроса по организации охлаждения рабочего пространства менее оптимистичной ситуацией является наибольшее отставание вентиляционного трубопровода от щита проходческо-очистного комбайна. Основные исходные данные представлены на рисунке 4.9.

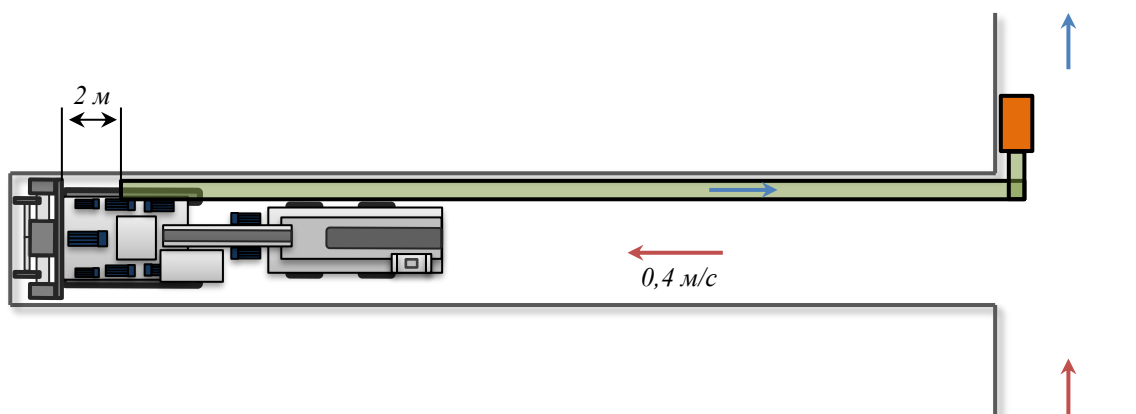


Рисунок 4.9 – Схема расположения оборудования в тупиковой выработке при всасывающем способе ее проветривания

Условия, представленные на рисунке 4.9, приняты для моделирования распределения температур в исследуемой области. Всасывающий вентиляционный трубопровод закреплен к стенке выработки на высоте 1 м от почвы и имеет диаметр 600 мм.

По результатам выполнения расчетов необходимо выдать рекомендации в части организации подачи холодного воздуха на рабочее место машиниста комбайна (размещение дефлекторов) для дальнейшего проектирования системы охлаждения. Решение данной задачи выполнено путем моделирования разных вариантов размещения дефлекторов холодного воздуха. Все рассмотренные сценарии в рамках трехмерного моделирования рассчитывались при условии открытой двери кабины машиниста. Такое решение принято в связи с тем, что в процессе эксплуатации проходческо-очистного комплекса машинисту комбайна необходимо выходить из кабины для осуществления вспомогательных технологических операций (бурение шпуров, осуществление ремонта оборудования, контроль направления проходки выработки, контроль за степенью наполнения кузова самоходного вагона при его погрузке и др.). Ситуация с открытой дверью является худшим сценарием с точки зрения определения мощности системы местного кондиционирования. Рассматривая возможный вариант с закрытой дверью кабины комбайна температурные параметры внутри будут лучше, чем при описанных в разделе ситуациях. Как следствие, разработка системы охлаждения с возможностью регулировки ее мощности позволит обеспечить требуемые температуры как внутри кабины с закрытой дверью, так и прикабинное пространство с открытой дверью.

В ходе моделирования определяется два возможных места подачи холодного воздуха: одно внутри кабины машиниста комбайна, а второе в прикабинном пространстве. Согласно результатам натурных исследований (рисунок 2.6) панель

управления комбайном включает в себя подвод гидравлических трасс, которые служат источником нагрева. Для внутренней части кабины выполнен расчет теплового баланса, чтобы определить величину теплового потока, которое излучает пульт управления комбайном. Согласно паспорту оборудования [57] посчитана общая площадь внутренней поверхности и поверхности пульта управления. Схематический данные величины представлена на рисунке 4.10

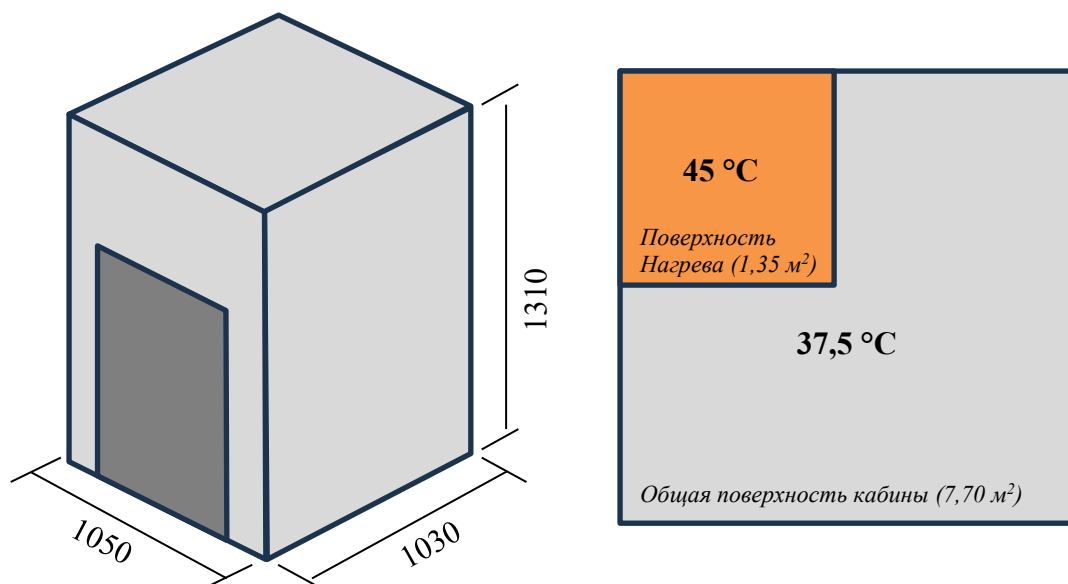


Рисунок 4.10 – Рассматриваемые варианты размещения мест подачи охлажденного

Величина теплового потока с поверхности пульта управления рассчитывалась по формуле [47,37]:

$$q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L}, \quad (4.2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°C;  $A$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $L$  – толщина материала, мм;  $\Delta T$  – разность температур.

Согласно результатам расчетов, удельная величина теплового потока для пульта машиниста комбайна составила 92,1 Вт/м<sup>2</sup>. Таким образом общая тепловая нагрузка пульта управления составляет 124 Вт.

Рассматриваемые сценарии в части организации мест подачи охлажденного воздуха представлены на рисунках 4.11 и 4.12.

Возможные места размещения внутри кабины (рисунок 4.11):

- на крыше, ближе к дверному проему кабины комбайна;
- на крыше, ближе к дальней стенке, относительно дверного проема.

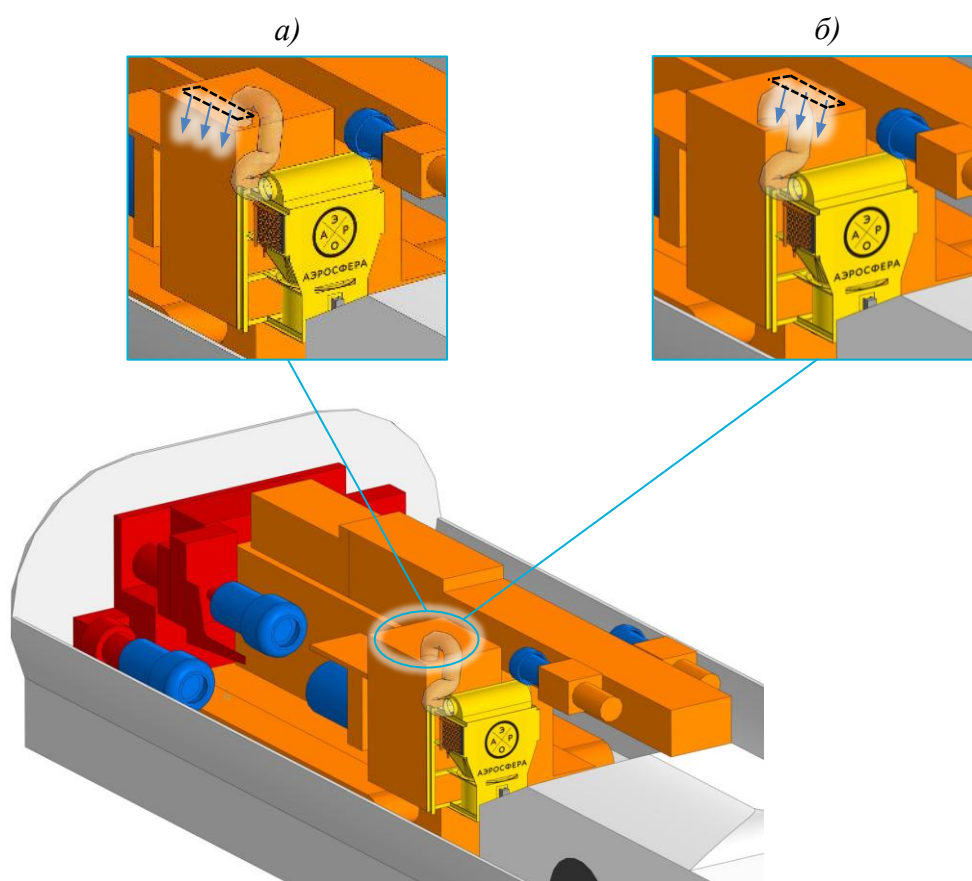


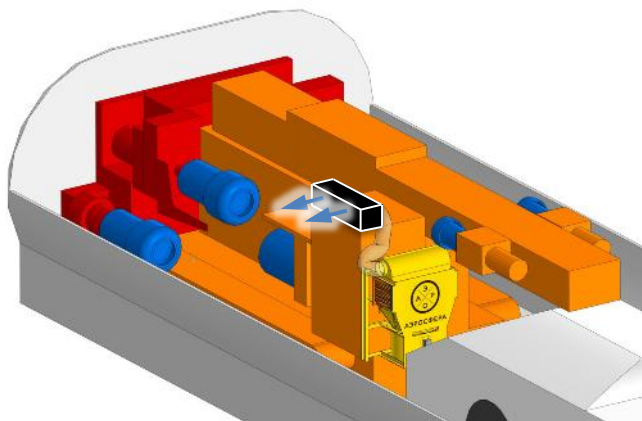
Рисунок 4.11 – Рассматриваемые варианты размещения мест подачи охлажденного воздуха внутри кабины машиниста комбайна:  
*а) – возле дверного проема кабины комбайна;*  
*б) ближе к дальней стенке кабины машиниста комбайна (относительно двери)*

Предварительные результаты моделирования показали, что из двух рассматриваемых вариантов оптимальным является место, расположенное поодаль от дверного проема кабины комбайна (рисунок 4.11 - б). В связи с этим остальные итерации расчетов выполнены именно для данного варианта. Возможные места размещения в прикабинном пространстве (рисунок 4.12):

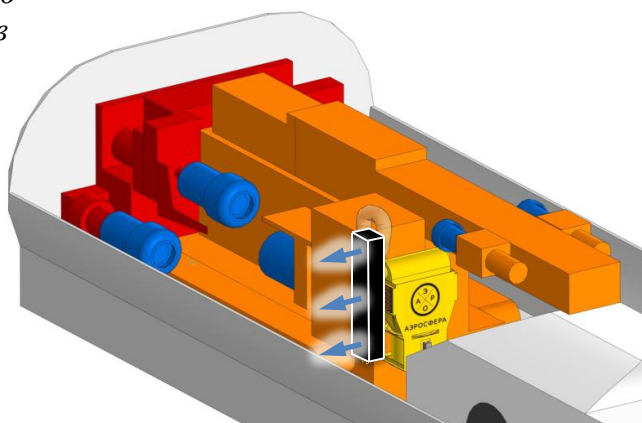
- на крыше кабины машиниста;
- на стенке кабины машиниста.

В предложенных вариантах рассматривается изменение направление потока охлажденного воздуха, выходящего из дефлекторов.

*а) Дефлекторы располагаются сверху на кабине машиниста. Воздух направлен в стенку выработки:*



*б) Дефлекторы располагаются сбоку кабины машиниста и вытянуты по всей ее высоте. Воздух направлен в стенку выработки:*



*в) Дефлекторы располагаются сбоку кабины машиниста и вытянуты по всей высоте. Воздух направлен параллельно дверному проему в сторону забоя:*

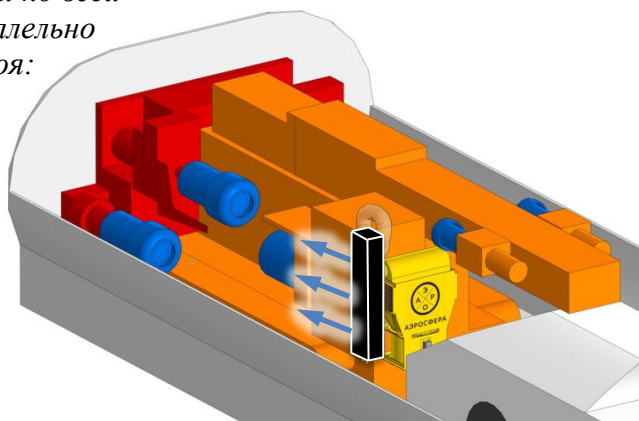


Рисунок 4.12 – Рассматриваемые варианты размещения мест подачи охлажденного воздуха на рабочее место машиниста комбайна

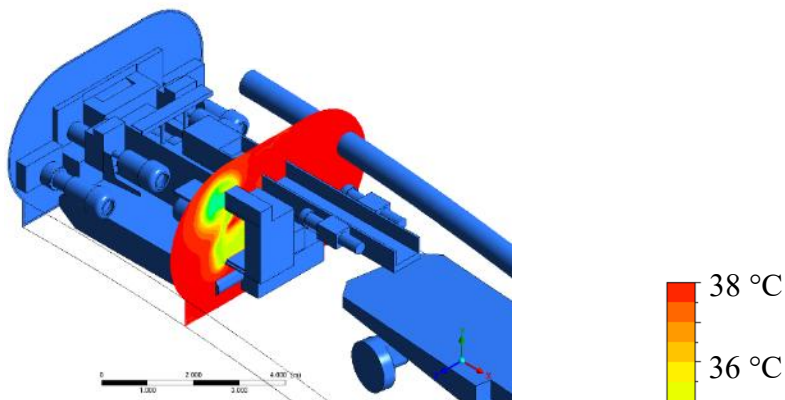
Возможные места размещения дефлекторов рассматривались в соответствии с реальным расположением элементов комбайна, не создавая помех для выполнения технологических процессов. Подробные результаты расчетов вариантов «а», «б» и «в» (рисунок 4.12) представлены далее.

### Размещение дефлекторов сверху (вариант «а»)

Расчет распределения температуры при организации места подачи холодного воздуха согласно рисунку 4.12 - а показали низкую эффективность.

Предлагаемая конфигурация оборудования не позволяет обеспечить охлаждение прикабинного пространства при требуемых параметрах СанПиН 2.2.4.3359-16 [59]. Результаты расчеты представлены на рисунке 4.13.

*Трехмерный вид на исследуемую область:*



*Сечение, проходящее через середину кабины:*

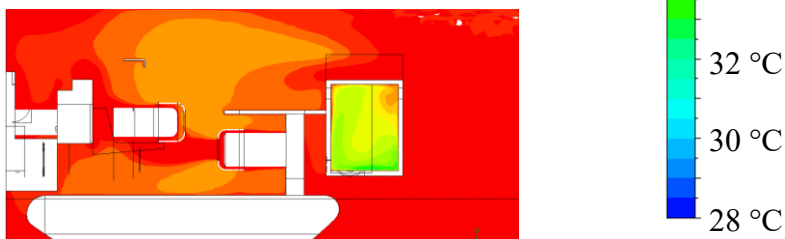


Рисунок 4.13 – Моделирование сценария, при котором охлажденный воздух подается через дефлекторы, размещенные на крыше комбайна

Охлажденный воздух в прикабинном пространстве распространяется преимущественно на уровне головы человека, и его температура колеблется в диапазоне 34 ... 35,5 °С. В связи с этим в дальнейших вариантах расчета принято решение изменить предполагаемые места размещения дефлекторов. Результатом расчетов является разработка рекомендаций для организации системы кондиционирования рабочего места машиниста комбайна.

### Направление охлажденного воздуха в стенку выработки (вариант «б»)

Рассмотрен вариант, представленный на рисунке 4.12 - б. В данном сценарии дефлекторы располагаются сбоку кабины машиниста и вытянуты по всей ее высоте, при этом поток охлажденного воздуха направлен в стенку выработки.

Результаты расчета распределения линий тока воздушной струи при всасывающем способе проветривания приведено на рисунке 4.14. Изменение цвета линий соответствует разным температурам, фиксируемым в результате моделирования.

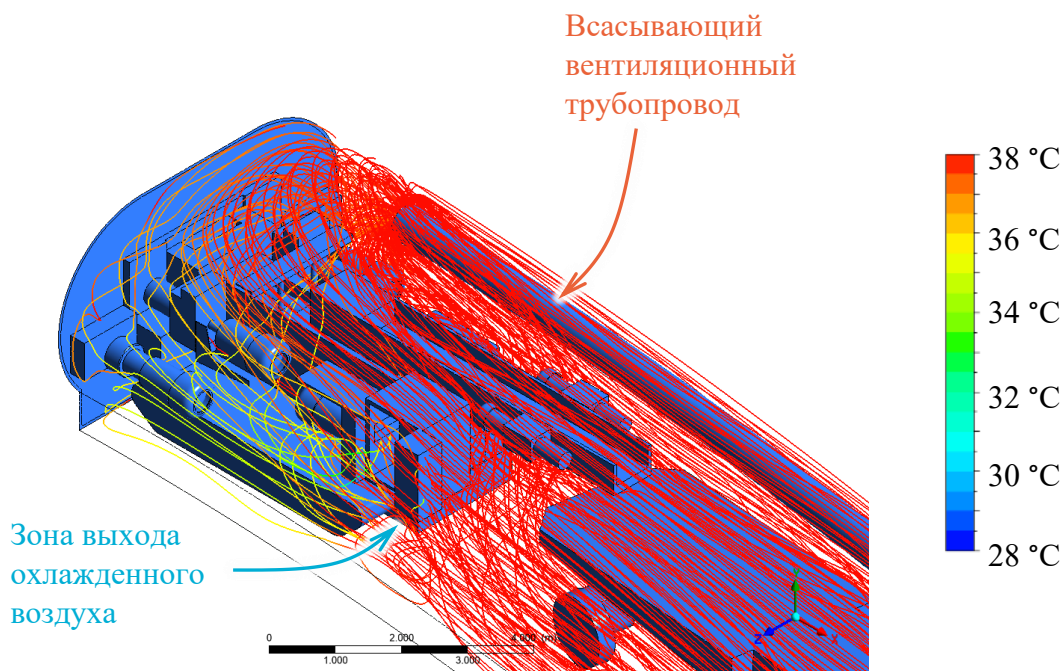


Рисунок 4.14 – Распределение линий тока воздушной струи при всасывающем способе проветривания

На представленных расчетах CFD модели наблюдается, что свежий воздух подается непосредственно по выработке и удаляется через всасывающий вентиляционный трубопровод. Поток обтекает оборудование и подхватывает охлажденный воздух, который выходит через дефлекторы, расположенные на кабине, в исследуемую область. В зоне перед комбайном и вокруг него формируются выраженные завихрения и рециркуляционные потоки, что указывает на наличие аэродинамических препятствий и неравномерность движения воздуха.

Результаты расчета поля температур воздуха, при котором охлажденный воздух выдается в направлении, перпендикулярном стенке выработки (рисунок 4.12 - б), представлены на рисунке 4.15. Способ проветривания при данном варианте расчета – всасывающий.

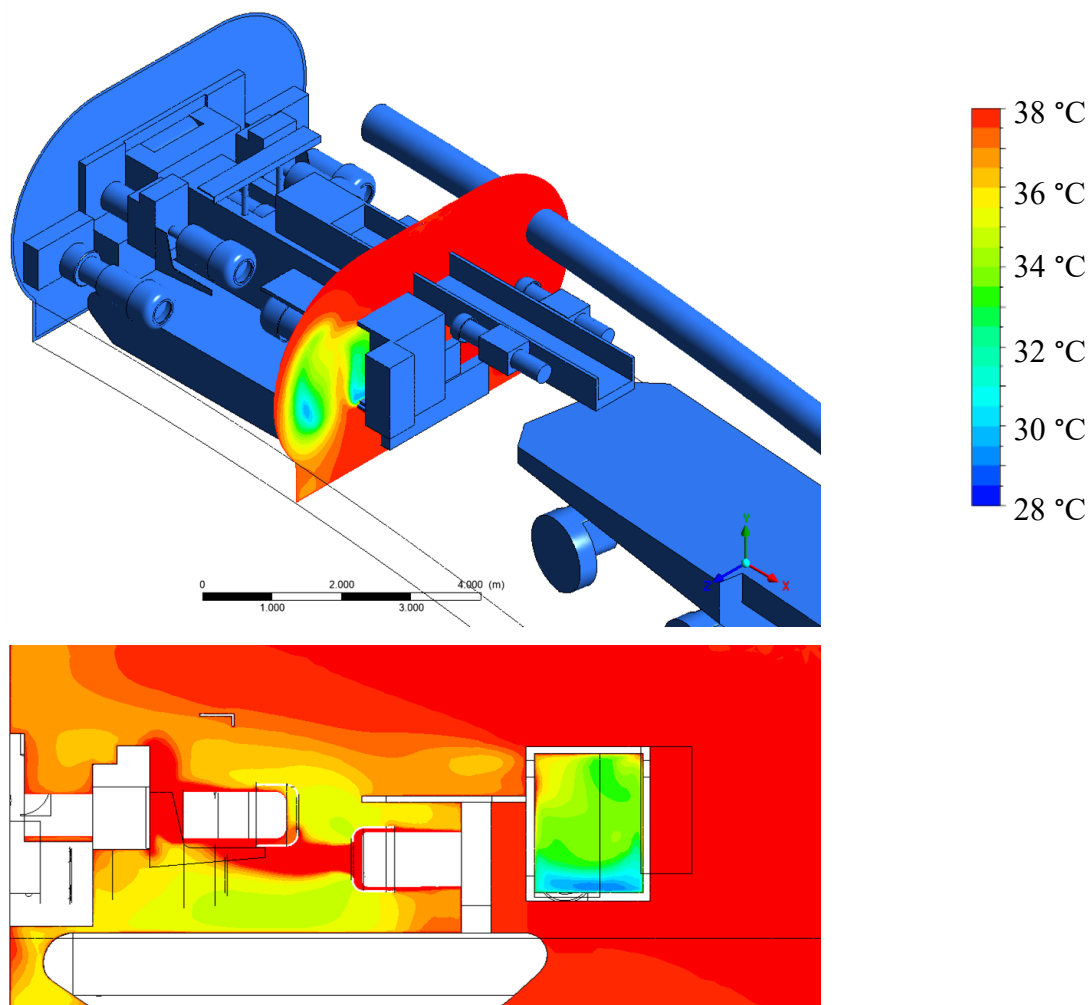


Рисунок 4.15 – Распределение температур внутри кабины комбайна и в прикабинном пространстве при всасывающем способе проветривания и подачи охлажденного воздуха в направлении к стенке выработки

Сечение, представленное на рисунке 4.15, проходит через середину кабины машиниста комбайна. Полученные результаты показали, что зона охлаждения прикабинного пространства в данном сценарии имеет достаточно обширные границы. Распространение охлажденного воздуха происходит вплоть до контура выработки и высота распространения данной зоны не ограничивается высотой кабины машиниста комбайна. Температура охлажденной зоны варьируется от 29 °C до 35 °C. Анализ температур линий движения воздуха показывает, что охлажденный воздух может распространяться вдоль площадки сбоку комбайна, которая соединяет кабину машиниста и оградительный щит. Таким образом, при выполнении вспомогательных работ машинист горной выемочной машины также будет находиться в зоне охлажденного воздуха.

Смещение зоны выхода охлажденного воздуха вглубь кабины позволило повысить равномерность распределения температур внутри кабины машиниста

комбайна. Таким образом, температура в зоне управления комбайном колеблется в диапазоне от 29 °С до 33 °С.

### Направление охлажденного воздуха вдоль кабины машиниста комбайна (вариант «в»)

Рассматриваемый сценарий предполагает собой размещение дефлекторов на кабине машиниста комбайна, с подачей охлажденного воздуха вдоль кабины, как представлено на рисунке 4.12 - в.

Формирование воздушного потока происходит согласно результатам, изображенным на рисунке 4.14. Отличием от предыдущего рассмотренного сценария является лишь зона, где охлажденный воздух входит в исследуемую область (возле кабины машиниста комбайна).

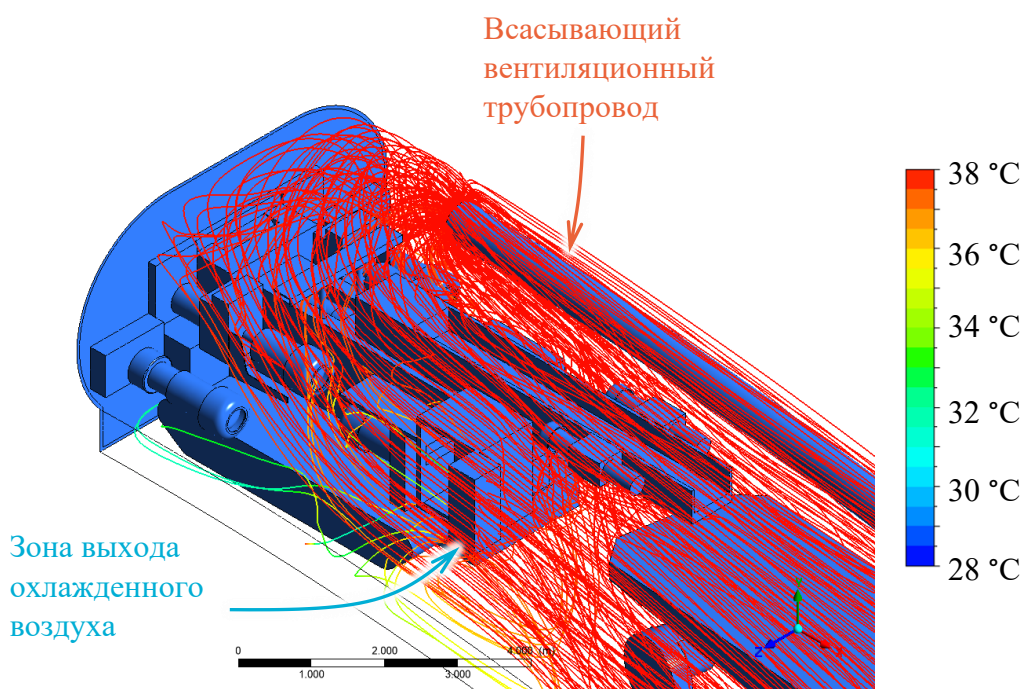


Рисунок 4.16 – Распределение линий тока воздушной струи при всасывающем способе проветривания

Исходные данные, принятые для моделирования, не изменяются относительно варианта, где поток охлажденного воздуха направлен в стенку выработки. Результаты расчета приведены на рисунке 4.17.

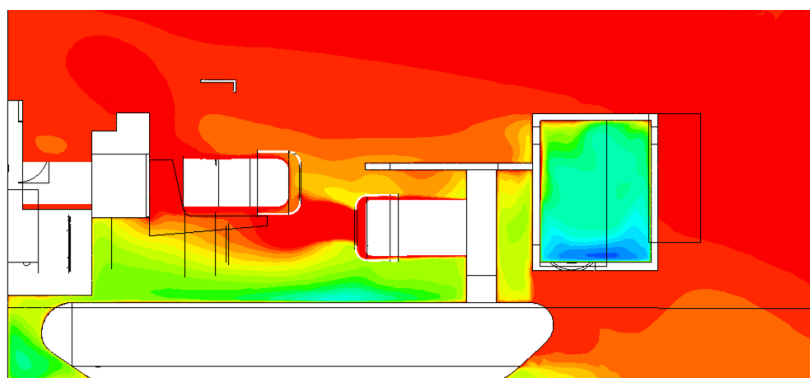
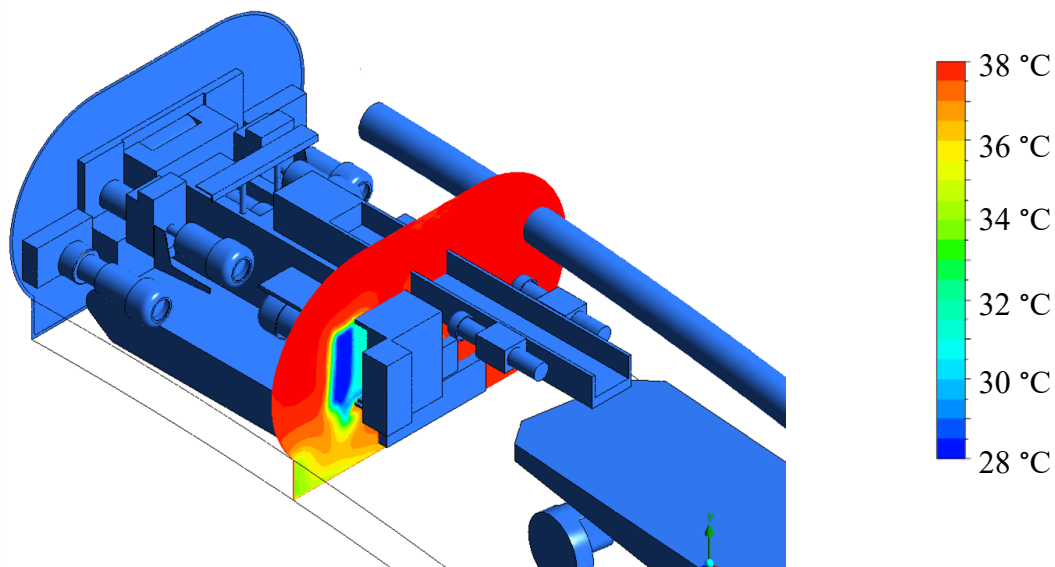


Рисунок 4.17 – Распределение температур внутри кабины комбайна и в прикабинном пространстве при всасывающем способе проветривания и подачи охлажденного воздуха вдоль кабины в сторону забоя

Согласно результатам, полученным в ходе многовариантного CFD моделирования, видны значительные изменения зоны распространения охлажденного воздуха в прикабинном пространстве. Поток холодной воздушной струи создает завесу вдоль дверного проема, температура в ядре которого равна 28 °С - 29 °С. Недостатком данного способа является небольшая ширина охлаждаемой зоны в направлении к стенке выработки, где преобладает температура окружающей среды. Таким образом рабочее прикабинное пространство охлаждается менее эффективно в сравнении с вариантом, когда дефлекторы направляют поток воздуха в сторону стенки выработки. Значительных изменений внутри кабины машиниста комбайна в сравнении с предыдущей серией расчетов не зафиксировано. Внутри кабины преобладает температура охлажденного воздуха, находящаяся в диапазоне 30 °С – 34 °С.

## Расчет параметров воздухоохладителя на кабине комбайна

Сравнительный анализ разных вариантов организации зоны выхода охлажденного воздуха показал следующее. Оптимальным вариантом размещения дефлекторов с подачей охлажденного воздуха в прикабинном пространстве является их установка сбоку на кабине и с направлением воздуха перпендикулярно дверному проему в сторону стенки выработки. Данный вариант представлен на рисунке 4.12 - б. Наиболее оптимальным вариантом размещения дефлекторов внутри кабины является область на крыше поодаль от дверного проема. При выполнении расчетов принимались во внимание требования СанПиН 2.2.4.3359-16 [59]. Разработанная система обеспечивает скорость движения воздуха не более 0,5 м/с и поддерживает максимальную допустимую температуру в выработке, не превышая значения 36°C, регламентируемую обоснованием безопасности опасного производственного объекта.

По результатам многовариантного моделирования были установлено, что оптимальным расходом воздуха для реализации системы локального охлаждения с соблюдением требований СанПиН 2.2.4.3359-16 [59] является расход, равный 0,3 м<sup>3</sup>/с в прикабинном пространстве и 0,1 м<sup>3</sup>/с внутри кабины машиниста.

Выводы, полученные в ходе проведения моделирования, позволяют выполнить расчет минимальной холодильной мощности, которую должен обеспечивать воздухоохладитель, располагающийся на кабине добычного комбайна. Температура окружающего воздуха при моделировании составляет 38 °С. Температура воздуха в сечении на выходе из воздухоохладителя по результатам расчетов принята на 10 °С меньше. Таким образом, рассчитана величина минимальной требуемой холодильной мощности воздухоохладителя:

$$Q = G \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (4.3)$$

где  $G$  – массовый расход воздуха, кг/с;  $c_p$  – удельная теплоёмкость воздуха, кДж/(кг·°С);  $\Delta T$  – разность температур до и после воздухоохладителя. Таким образом, для проектирования воздухоохладителя принята требуемая холодильная мощность, равная 5 кВт с учетом технологического запаса.

### 4.3 Сравнительный анализ предлагаемой системы в условиях нагнетательного и комбинированного способов проветривания тупиковой выработки

В данном разделе производится сравнительный анализ системы местного кондиционирования воздуха при разных способах проветривания тупиковой выработки: всасывающем, нагнетательном и комбинированном. Сравнение производится при

условии, что величина мощности воздухоохладителей не превышает полученной ранее величины равной 5 кВт.

По результатам выполненного ранее моделирования выбран оптимальный вариант размещения дефлекторов – вариант, когда поток воздуха направлен перпендикулярно дверному проему машиниста комбайна в направлении к стенке выработки (рисунок 4.18).

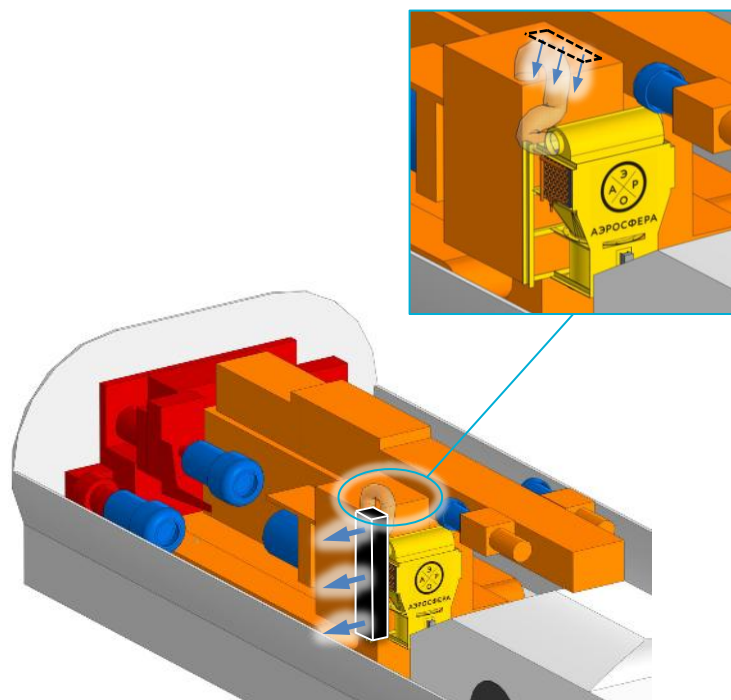


Рисунок 4.18 – Выбранный оптимальный вариант размещения дефлекторов для подачи охлажденного воздуха на рабочее пространство машиниста комбайна

При моделировании распределения температур в условиях нагнетательного и комбинированного способов проветривания приняты следующие исходные данные.

*1. Нагнетательный способ проветривания.*

Отставание нагнетательного трубопровода от кабины комбайна принято равным 10 м. Скорость воздуха на выходе из нагнетательного вентиляционного трубопровода составляет 12,5 м/с. Расход воздуха в выработке – 3,5 м<sup>3</sup>/с. Диаметр нагнетательного вентиляционного трубопровода составляет 600 мм. Начальная модельная температура принята равной 38°С.

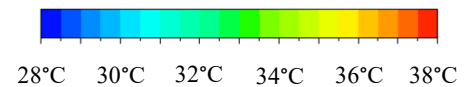
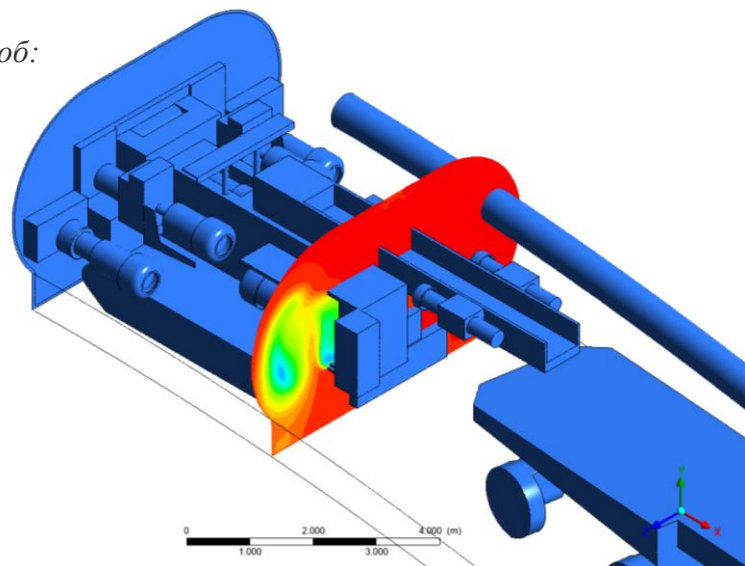
*2. Комбинированный (с преобладанием всасывающего) способ проветривания.*

Отставание нагнетательного трубопровода от кабины комбайна – 10 м. Скорость воздуха на выходе из нагнетательного вентиляционного трубопровода составляет 15,2 м/с. Расход воздуха в нагнетательном трубопроводе – 1,98 м<sup>3</sup>/с. Диаметр нагнетательного вентиляционного трубопровода составляет 400 мм.

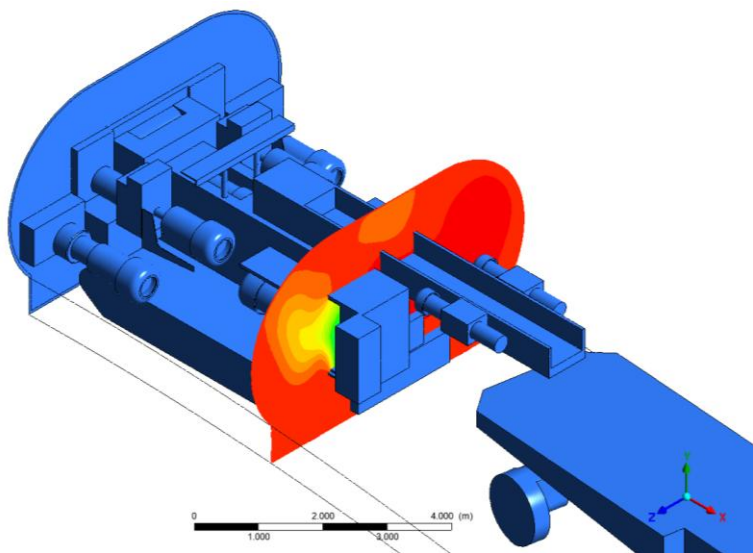
Отставание всасывающего трубопровода от щита комбайна – 4 м. Скорость воздуха на входе во всасывающий вентиляционный трубопровод составляет 28,3 м/с. Расход воздуха во всасывающем трубопроводе – 7,9 м<sup>3</sup>/с. Диаметр всасывающего вентиляционного трубопровода составляет 600 мм. Скорость воздуха в тупиковой выработке 0,3 м/с (воздух движется в направлении забоя). Согласно ранее выполненным исследованиям в части нормализации пылевой обстановки [118], чем больше преобладание производительности всасывающего вентилятора над нагнетательным, тем более эффективна система вентиляции по параметру нормализации пылевой обстановки. В связи с этим при моделировании производительность нагнетательного вентилятора составляет 25% от общего расхода воздуха, фиксируемого во всасывающем трубопроводе. Параметры подачи охлажденного воздуха в исследуемую область остались аналогичны предыдущим вариантам расчета.

Таким образом, в сравнительном анализе рассматриваются всасывающий, нагнетательный и комбинированный (с преобладанием всасывающего вентилятора) способы проветривания. Результаты расчета комбинированного способа вынесены к общему сравнительному анализу и представлены на рисунках 4.19 - 4.20.

*Всасывающий способ:*



*Нагнетательный способ:*



*Комбинированный способ:*

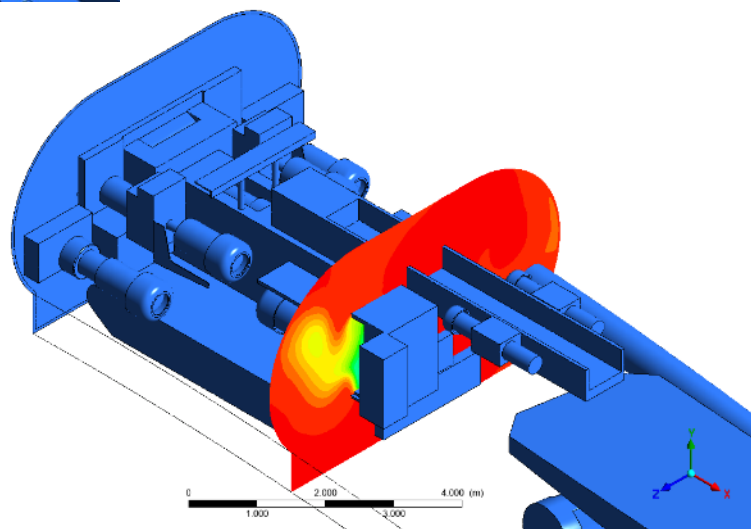
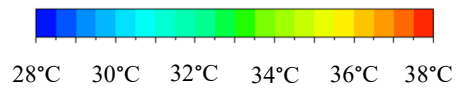
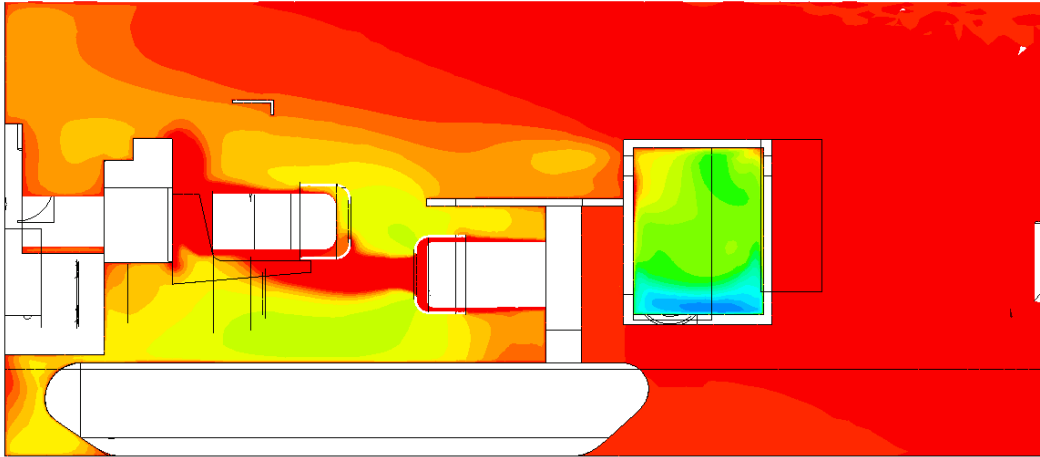


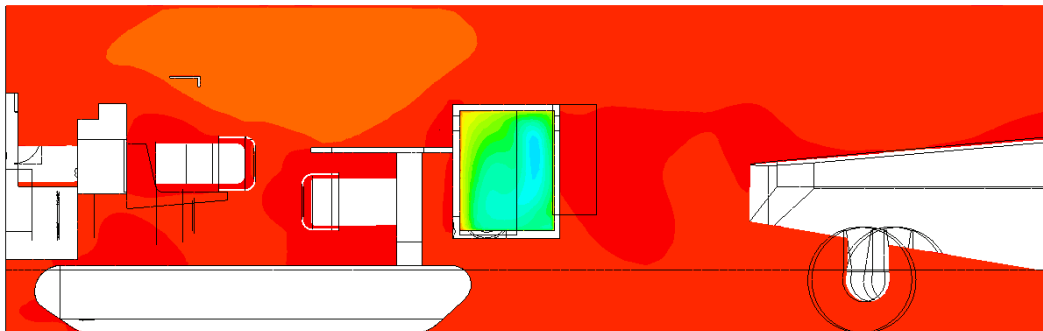
Рисунок 4.19 — Сравнение распределения температур в прикабинном пространстве при разных способах проветривания забоя



*Всасывающий способ:*



*Нагнетательный способ:*



*Комбинированный способ:*

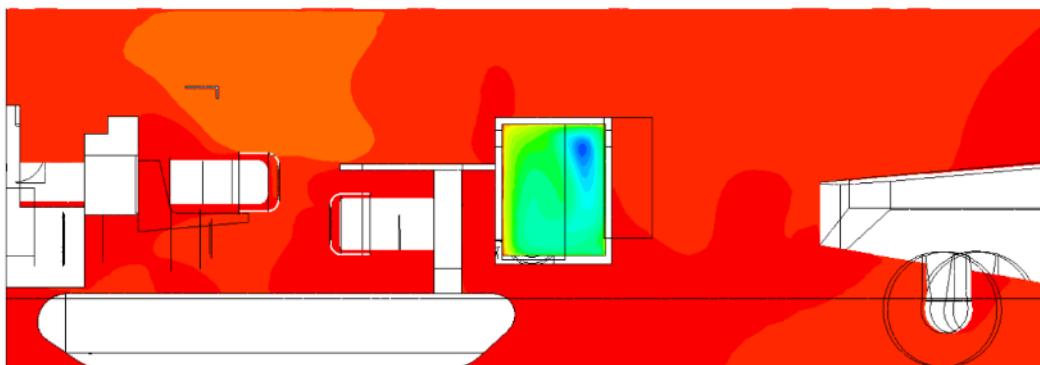


Рисунок 4.20 — Сравнение распределения температур внутри кабины при разных способах проветривания забоя

Комбинированный способ проветривания, аналогично нагнетательному, характеризуется высокими скоростями потока воздуха в зоне расположения кабины машиниста комбайна. Это связано с наличием нагнетательного вентиляционного трубопровода, который располагается со стороны кабины в 10 метрах от нее. Как следствие, пониженные температуры концентрируются в основном внутри кабины, тогда как окружающее пространство в большей степени сохраняет высокотемпературный фон. Наличие высоких скоростей в прикабинном пространстве снижает эффективность системы местного кондиционирования, потому что поток воздуха, выходящий из дефлекторов системы кондиционера, быстро увлекается за внешним потоком в сторону забоя. Результаты моделирования показали, что зона охлаждения имеет незначительные геометрические размеры и при этом температура воздуха колеблется в диапазоне 35 °С - 36 °С. Рассматривая зону внутри кабины машиниста комбайна, можно сказать об эффективности предлагаемых мероприятий. Внутри кабины преобладает температура охлажденного воздуха в диапазоне 30 °С – 32 °С. Имеется локальный участок в верхней зоне кабины с температурой 27 °С. С практической точки зрения это означает, что нагнетательная схема способна создавать приемлемые условия непосредственно в точке подачи воздуха, но хуже перераспределяет охлаждение в рабочем объеме выработки.

При всасывающем способе проветривания в исследуемом сечении наблюдается более развитая зона пониженных температур в прикабинном пространстве. Охлажденная область охватывает не только внутреннее пространство, но и зону вне кабины. Зона охлаждения заполняет практически все пространство от кабины машиниста до борта выработки, чего не наблюдается при других способах проветривания. Температура охлажденной зоны находится в диапазоне от 29 °С до 35 °С.

Анализируя эффективность системы местного кондиционирования при охлаждении внутрикабинного пространства (рисунок 4.20), можно сделать вывод, что при всех рассматриваемых способах проветривания замечен эффект, характеризующийся снижением температуры воздуха. При всасывающем способе температура внутри кабины находится в диапазоне от 29 °С до 33 °С; при нагнетательном способе температура находится в диапазоне от 29 °С до 32 °С; при комбинированном способе с преобладанием всасывающего вентилятора температура воздуха находится в диапазоне от 30 °С до 32 °С.

Все рассматриваемые сценарии моделировались с условием того, что дверь кабины машиниста комбайна находится в положении «открыто», таким образом, изменяя положение двери можно достичь большего эффекта с точки зрения охлаждения

кабины комбайна при нагнетательном и комбинированном способах проветривания забоя.

Таким образом, проведенное численное моделирование распределения полей температур воздуха при разных способах проветривания тупиковой выработки позволило сделать следующие выводы. Наибольшая эффективность охлаждения зоны прикабинного пространства достигается при всасывающем способе проветривания. В этом случае поток холодного воздуха достигает контура стенок выработки и распространяется по всей высоте от площадки кабины до ее наивысшей точки. Рассматривая нагнетательный и комбинированный способы проветривания, стоит отметить наличие высоких скоростей около кабины машиниста, ввиду находящегося рядом нагнетательного вентиляционного трубопровода. Из-за воздействия скоростного потока охлаждаемый воздух быстро сносится к щиту комбайна, в результате чего эффективность системы локального охлаждения значительно снижается.

В целом результаты моделирования показали, что пространство внутри кабины охлаждается примерно одинаково вне зависимости от предлагаемой схемы проветривания тупиковой выработки, но наибольшая эффективность зафиксирована при всасывающем способе.

### **Выводы по разделу**

В данном разделе описаны результаты трехмерного численного моделирования, которые в дальнейшем послужат для проектирования систем охлаждения рабочего места машиниста проходческо-очистного комбайна. Задача данного этапа – организовать подачу охлажденного воздуха на рабочее место машиниста комбайна и определить параметры проветривания призабойного пространства в условиях калийного рудника Гремячинского ГОК. Под рабочим местом подразумевается объем внутри кабины комбайна и прикабинное пространство. Согласно наблюдениям, выполненным при натурных исследованиях, именно в данных местах машинист находится большую часть времени при осуществлении добычи калийной руды.

Анализ полученных результатов моделирования показал, что наиболее эффективным является всасывающий способ проветривания. Это обусловлено тем, что в призабойном пространстве воздух движется с меньшей скоростью, чем при нагнетательном способе. Таким образом, охлажденный воздух, поступающий в исследуемую область, равномерно распространяется и занимает больший объем (рисунок 4.14). При нагнетательном же способе проветривания тупиковой выработки

охлажденный воздух попадает в исследуемую область и далее переносится в призабойное пространство потоком, выходящим из вентиляционного трубопровода.

Оптимальным вариантом размещения дефлекторов с подачей охлажденного воздуха в прикабинном пространстве является их размещение сбоку на кабине и с направлением воздуха перпендикулярным дверному проему в сторону стенки выработки. Данный вариант представлен на рисунке 4.12 - б. Внутри кабины наилучший результат дает размещение дефлекторов (чего?) ближе к дальней стенке относительно дверного проема. При выполнении расчетов принимались во внимание требования СанПиН 2.2.4.3359-16 [59]. Разработанная система обеспечивает скорость движения воздуха не более 0,5 м/с и поддерживает максимально допустимую температуру в выработке на уровне 36°C.

Таким образом, наилучшим выбранным вариантом принят всасывающий способ проветривания тупиковой выработки с расположением дефлекторов и направлением потока воздуха, представленным на рисунок 4.18.

Практическая реализация системы местного кондиционирования должна учитывать наличие регулируемой мощности системы, возможность изменения направления воздушного потока и обеспечение минимальной требуемой холодильной мощности в 5 кВт. Все расчеты выполнены для наихудшего сценария с открытой дверью кабины, при закрытии которой эффективность охлаждения будет выше. Результаты работ опубликованы в статье [36].

В следующей главе представлены технические решения, направленные на разработку системы локального кондиционирования воздуха, выполненные на основе результатов трехмерного моделирования. Численные исследования послужили основой для выбора конструктивных решений и обоснования параметров работы разрабатываемой системы.

## **5 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ МАШИНИСТА КОМБАЙНА**

С целью улучшения микроклиматических параметров на рабочем месте машиниста комбайна необходима техническая проработка системы локального кондиционирования воздуха. Функциональные возможности, которые должны решаться при разработке такого оборудования, выглядят следующим образом:

- охлаждение воздуха в замкнутом пространстве;
- охлаждение неогороженной или частично огороженной зоны работы персонала в продуваемой части выработки;
- охлаждение воздуха в зоне работы персонала с одновременным проветриванием тупиковой выработки всасывающим способом.

Разрабатываемое оборудование должно соответствовать стандартам и требованиям нормативной документации, действие которой распространяется на эксплуатацию оборудования в условиях горных выработок. Основные требования представлены в источниках [54,53,9].

### **5.1 Методологические основы разработки системы локального охлаждения воздуха в тупиковой комбайновой выработке**

Обеспечение допустимых температурных параметров в призабойном пространстве возможно путем разработки систем локального кондиционирования воздуха. 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. Методологическая основа проектирования, основанная на результатах данного диссертационного исследования, строится на следующих принципах:

1. Сопряженное рассмотрение теплообмена в системе «вентиляционный трубопровод – рудничный воздух – породный массив»;
2. Использование принципов многоуровневого моделирования;
3. Валидация и параметризация модели;
4. Интеграция разрабатываемой системы в общую систему проветривания тупиковой выработки;
5. Оптимизация компоновки оборудования для снижения трудозатрат на её эксплуатацию и ремонт.

На рисунке 5.1 представлена блок-схема методики проектирования системы локального кондиционирования воздуха для тупиковой выработки.



Рисунок 5.1 – Блок-схема для разработки системы локального кондиционирования призабойного пространства

Представленная схема отражает последовательность этапов, выполняемых при разработке системы кондиционирования от стадии выбора способа охлаждения до стадии проведения опытных испытаний разработанного изделия и оценки эффективности предлагаемых решений.

Особенностью предлагаемого подхода является возможность его использования как для действующих рудников, так и для проектируемых. В первом случае исходные данные формируются по результатам натуральных исследований, а во втором случае – на основе математических расчетов и одномерного моделирования.

### 5.1.1 Анализ способов охлаждения рудничного воздуха для разработки системы местного кондиционирования

Разработка системы локального кондиционирования воздуха – это задача, требующая детальной проработки. Основными сложностями при проектировании данных систем являются условия, в которых оборудование будет эксплуатироваться. В связи с этим к разрабатываемой системе определены следующие требования:

- возможность монтажа в условиях ограниченного пространства;
- возможность частого ремонта, ввиду продвижения фронта горных работ;
- оборудование должно быть выполнено во взрывозащищенном исполнении;
- при проектировании должен быть учтен ограниченный ресурс инженерных коммуникаций, в том числе, отсутствие подземных водоводов;
- оборудование должно оказывать минимальное влияние на технологический процесс в части эксплуатации и ремонта;
- разрабатываемая система должна быть более энергоэффективна в сравнении с ранее использованными способами [17].

Предлагаемые в данном исследовании технические решения по управлению тепловым режимом на рабочем месте машиниста комбайна основаны на использовании парокомпрессионного метода охлаждения воздуха. Метод является одним из наиболее широко применяемых, он основан на принципе циклического сжатия и испарения рециркулируемого хладагента [19,77].

Оценка энергоэффективности систем охлаждения производится с помощью коэффициента COP (coefficient of performance) – холодильный коэффициент [98,91]:

$$COP = \frac{Q_{\text{хол}}}{W}, \quad (5.1)$$

где  $Q_{\text{хол}}$  – количество теплоты, отведенной от охлаждающей среды, кВт,  
 $W$  – количество затраченной электрической энергии на работу оборудования, кВт.

Оборудование, основанное на парокомпрессионном принципе охлаждения, обладает высоким коэффициентом COP, величина которого в благоприятных условиях может достигать значения 6 [39]. Технология на сегодняшний день хорошо изучена и проверена в условиях горных выработок. Широкий выбор существующих хладагентов позволяет проектировать системы под разные требования безопасности, в том числе и под условия подземного рудника Гремячинского ГОК [17]. Машины, работающие по принципу парокомпрессионного охлаждения, возможно оснастить разной степенью автоматизации, что дает возможность гибко регулировать температуру воздуха, в том числе, под требования СанПиН [59,58].

Исходные данные для проведения проектирования холодильной машины, работающей по принципу парокомпрессионного охлаждения, и для дальнейшего расчета теплообменного оборудования представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 — Исходные данные, заложенные для проектирования

Параметр	Значение
Температура охлажденного воздуха, регулируемая, от-до	+18 ... +36°C
Номинальная температура наружного воздуха, до	40 °C
Максимальная температура наружного воздуха	55 °C
Холодильный агент	Фреон R134a
Относительная влажность, до	99 %
Плотность воздуха, до	1,3 кг/м <sup>3</sup>

Исходные данные, принятые к проектированию оборудования, учитывают запас мощности, закладываемый на разные условия эксплуатации.

### 5.1.2 Построение модели распределения температур в призабойном пространстве

Для более детальной проработки проектируемой системы в части определения зоны охлаждения, а также для выбора оптимальных мест размещения дефлекторов необходимо выполнить трехмерное моделирование распределения полей температур и скоростей. Расчеты выполняются в программном комплексе Ansys Fluent с использованием моделей турбулентного течения воздуха. Для выполнения корректных расчетов необходимо разработать детализированную геометрию исследуемой области.

В случае эксплуатируемого рудника модель настраивается по результатам выполнения натурных исследований на объекте, для которого выполняются расчеты, или аналогичном ему. Натурные исследования должны включать в себя определение основных траекторий движения воздуха, определение температуры поверхностей оборудования и массива, а также определения степени влияния системы вентиляции на температурный режим. На основе полученных данных выполняется валидация и дальнейшие расчеты.

В случае, если технические мероприятия разрабатываются для проектируемого рудника или его участка, настройка трехмерной модели выполняется по результатам

численного моделирования в одномерной постановке задачи. Предлагаемый метод основан на синтезе двух моделей. Одномерная постановка задачи позволяет выполнить расчет граничных условий (температуры на входе в исследуемую область) и настроить трехмерную модель расчета полей температур и скоростей воздуха.

Результаты трехмерного моделирования позволяют получить поле распределения скоростей воздуха, а также проанализировать изменение температуры в исследуемой области. Причем точность расчетов позволяет оценить скорости воздуха и его температуры в разных точках призабойного пространства. На основе полученных данных в модель добавляются источники входа в расчетную область охлажденного воздуха и рассчитываются поля распределения охлажденного воздуха. Примеры результатов расчетов представлены на рисунке 4.19.

Расчет минимальной требуемой величины холодильной мощности воздухоохладителя выполняется по формуле:

$$Q = G \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (5.2)$$

где  $G$  – массовый расход воздуха, кг/с;  $c_p$  – удельная теплоёмкость воздуха, кДж/(кг·°C);  $\Delta T$  – разность температур до и после воздухоохладителя, °C.

По результатам моделирования выполняется черновая проработка концепта предлагаемой системы локального кондиционирования с учетом размещения оборудования и расчетом возможных потерь при транспортировке хладоносителя.

### 5.1.3 Разработка концепции системы местного кондиционирования

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 место;
- вентилятор местного проветривания с вентиляционным трубопроводом.

Описанные элементы в совокупности представляют собой систему кондиционирования воздуха (в дальнейшем СКВ). На рисунке 5.2 представлен концепт разрабатываемой СКВ.

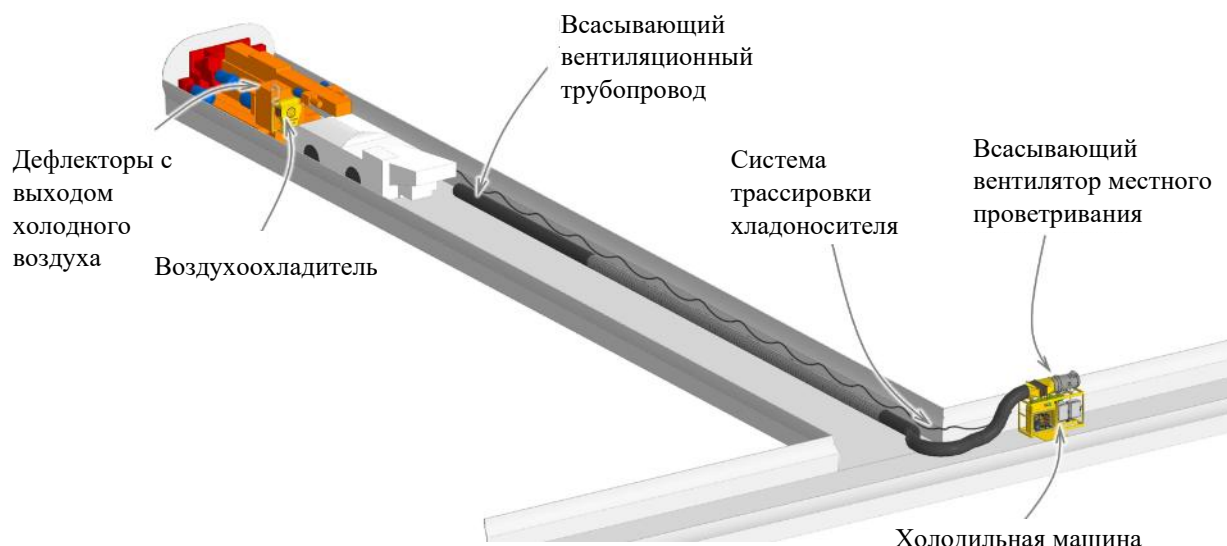


Рисунок 5.2 – Концепт системы кондиционирования воздуха (СКВ)

Предлагаемая система работает по принципу замкнутого цикла в комплексе с системой вентиляции, основанной на всасывающем способе проветривания. Главной задачей разрабатываемой системы является передача тепловой энергии, полученной из воздухоохладителя, фреону холодильной машины через промежуточный теплоноситель. Рассмотрим предназначение каждого компонента подробнее.

Холодильная машина предназначена для подготовки и охлаждения промежуточного хладагента и последующей его транспортировки. Нагретый теплоноситель транспортируется к холодильной машине, размещённой вне зоны локального охлаждения. В испарителе холодильной машины происходит теплообмен между промежуточным контуром и конденсатором. Полученное конденсатором тепло отводится в исходящую струю вентиляционного трубопровода и в дальнейшем удаляется по вентиляционным выработкам и вентиляционному стволу на поверхность.

В рамках данного исследования совместно с «НПО «Аэросфера» выполнена разработка шахтной холодильной машины КШв, которая легла в основу проектирования СКВ. На рисунке 5.3 представлена технологическая схема холодильной машины КШв.

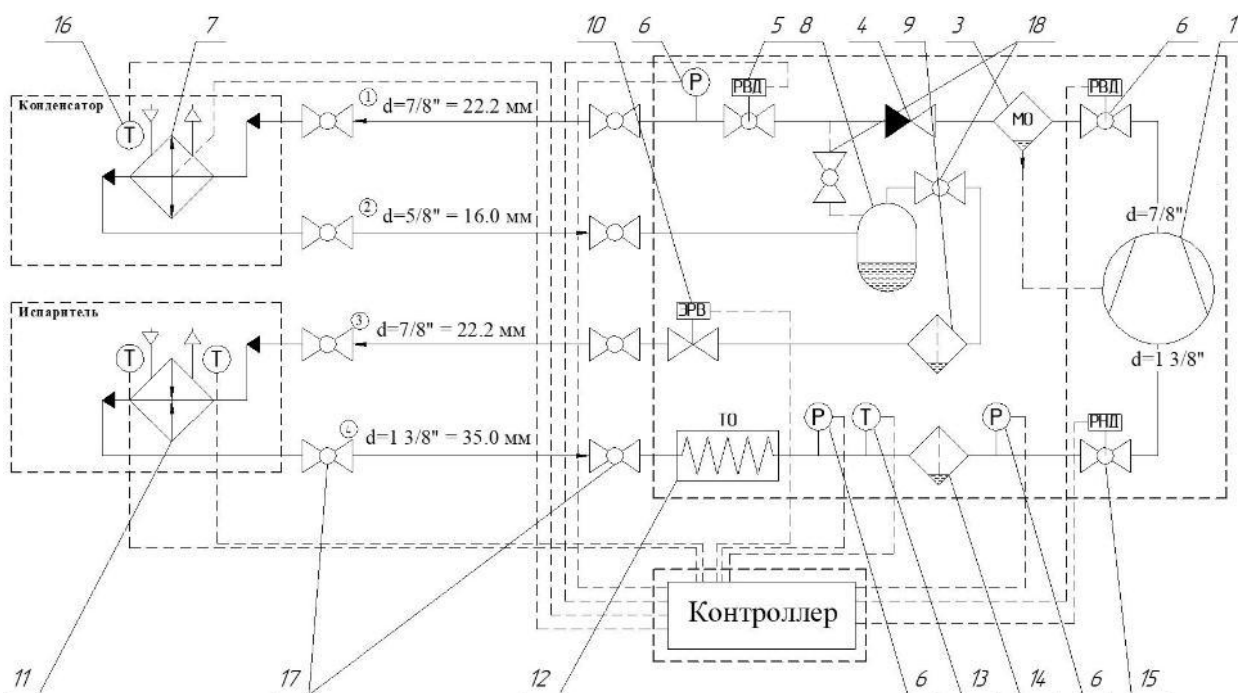


Рисунок 5.3 – Принципиальная схема холодильной машины КШв, разрабатываемой для системы СКВ

Элементы, пронумерованные на рисунке 5.3, имеют свое наименование и описаны в таблице 5.2.

Таблица 5.2 — Наименование элементов принципиальной схемы

№	Наименование
1	Герметичный спиральный компрессор
2	Запорный клапан (вентиль) типа Rotalock с реле высокого давления
3	Маслоотделитель
4	Обратный клапан
5	Реле высокого давления управления вентилятором конденсатора (без клапана)
6	Датчик(преобразователь) высокого давления
7	Конденсатор воздушного охлаждения
8	Линейный ресивер
9	Фильтр-осушитель
10	Электронный расширительный клапан с электромагнитной катушкой
11	Испаритель, воздухоохладитель
12	Теплоутилизатор компрессорного блока
13	Датчик температуры накладной
14	Фильтр для трубопровода всасывания
15	Запорный клапан (вентиль) типа Rotalock с реле низкого давления

№	Наименование
16	Датчик температуры воздуха
17	Шаровой кран (вентиль)
18	Запорный клапан (вентиль) типа Rotalock

Технологическая схема холодильного цикла реализована по принципу ступенчатого регулирования, путем применения регулятора, представляющего собой четырехступенчатый контроллер. С его помощью и происходит нагрузка или разгрузка компрессора, согласно установленному на линии всасывания датчику низкого давления или реле низкого давления.

Требуемая холодильная мощность высчитывается из условий необходимых параметров воздухоохладителя, расположенного на кабине комбайна, и потерь при транспортировке хладагента к нему по трассе. Трасса промежуточного теплоносителя предназначена для доставки хладагента в воздухоохладитель. Концепт разрабатываемой конструкции учитывает увеличение длины тупиковой выработки, которое происходит в процессе работы добычного комбайна. Для реализации транспортировки хладоносителя используются гибкие рукава с запорной арматурой. Удлинение может выполняться за счет использования катушки с роторным устройством, на которой предусмотрена намотка гибких шлангов (рисунок 5.4).



Рисунок 5.4 – Пример исполнения катушки с рукавами и роторным устройством для транспортировки хладоносителя

Катушка располагается возле стенки выработки на раме с полозьями и перемещается вслед за комбайном. При полной размотке катушки допускается использование следующей катушки. После окончания работ краны концов шлангов перекрываются, и шланги сматываются обратно на катушки без слива рабочей жидкости. Стоит отметить, что в случае невозможности применения катушек наращивание трассы допускается прокладкой рукавов по почве или поверх вентиляционного трубопровода.

Величина требуемой хладопроизводительности воздухоохладителя рассчитана в главе 4 и составила 5 кВт. Стоит отметить, что при транспортировке хладоносителя от холодильной машины к воздухоохладителю возникают тепловые потери. Эти потери складываются в результате конвективного теплообмена трассы с воздухом и теплопередачи от поверхности массива (в случае, если трасса проложена по почве выработки). Теплоперенос внутри трассы хладоносителя описан уравнением (5.3):

$$G_B \cdot c_B \cdot \frac{\partial T_B}{\partial x} = \alpha_B \cdot P_B \cdot (T_S - T_B) + q(x), \quad (5.3)$$

где  $G_B$  – массовый расход воды, кг/с;  $c_B$  – удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·К);  $\frac{\partial T_B}{\partial x}$  – градиент температуры воды вдоль длины трассы;  $\alpha_B$  – коэффициент теплоотдачи от воды к стенке шланга, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $P_B$  – внутренний периметр шланга, м;  $T_S$  – температура наружной поверхности изоляции трассы, °С;  $T_B$  – температура воды, °С;  $q(x)$  – удельная тепловая нагрузка, приходящаяся на единицу длины трубопровода, Вт/м.

На основании системы уравнений (5.3) и (3.2), определены потери холода при транспортировке воды от холодильной машины к забою и в обратном направлении. Таким образом, потери холода при транспортировке хладоносителя по контуру «холодильная машина – воздухоохладитель – холодильная машина» составили 7 кВт. Суммируя требуемую минимальную холодильную мощность воздухоохладителя и потери при транспортировке хладоносителя, получаем величину хладопроизводительности холодильной машины КШв – 13 кВт. Поскольку фронт ведения горных работ имеет нестационарный характер, а условия эксплуатации СКВ могут изменяться в зависимости от технологических процессов, в величину хладопроизводительности заложен технологический запас – 15 %. Учитывая описанные факторы, минимальная требуемая хладопроизводительность при проектировании холодильной машины КШв составила 15 кВт, поэтому оборудование получило название КШв-15.

На первом этапе транспортировки хладагент поступает в воздухоохладительную установку, предназначенную для охлаждения воздуха перед его подачей в зону рабочего места. Воздухоохладитель может располагаться непосредственно перед зоной

охлаждения поодаль от места установки холодильной машины. В данном случае воздухоохладитель располагается на кабине машиниста комбайна (рисунок 5.2). Основным элементом воздухоохладителя является теплообменник «воздух-вода», в котором происходит передача тепловой энергии от горячего воздуха промежуточному теплоносителю, после чего нагретая вода поступает в кожухотрубный теплообменник и совершает повторный цикл передачи тепловой энергии. Одним из важных критериев при разработке теплообменника является исключение процесса появления влаги на его поверхности при работе. Это связано с тем, что в условиях соляной пыли влажная поверхность теплообменника быстро выйдет из строя.

Для подачи охлажденного воздуха в рабочее пространство комбайн необходимо оснастить дефлекторами. После воздухоохладителя охлажденный воздух по каналам подается в раздаточные, регулируемые по положению, каналы. Система распределения охлаждающего воздуха должна иметь несколько полужестких патрубков, способных менять направление потока воздуха независимо друг от друга. Исходные данные по расположению дефлекторов представлены в главе 4.

Для эффективной и безопасной работы оборудование должно быть оснащено системой автоматического управления (САУ) его работой. Холодильная машина оборудуется датчиками контроля параметров составляющих ее элементов, а также параметров хладоносителя и рудничного воздуха. САУ обеспечивает обработку полученных с датчиков данных и осуществляет управление оборудованием по ранее заданным алгоритмам.

Разрабатываемая система охлаждения воздуха включает в себя систему вентиляции призабойного пространства, основанную на всасывающем способе проветривания. Система вентиляции организуется таким образом, что подача воздуха в призабойное пространство осуществляется по горной выработке, а удаление загрязненного потока происходит по жесткому вентиляционному трубопроводу. Основной сложностью при реализации всасывающего способа проветривания является правильный подбор и эксплуатация всасывающего вентиляционного трубопровода [62].

## **5.2 Практическая реализация системы местного кондиционирования и ее заводские испытания, описание условий проведения испытаний**

В рамках практической реализации научно-исследовательской работы на базе НПО «Аэросфера» выполнена разработка опытной холодильной машины КШв-15. Установка предназначена для обеспечения системы кондиционирования воздуха хладопроизводительностью не менее 15 кВт. Общий вид готового изделия представлен на рисунке 5.5.

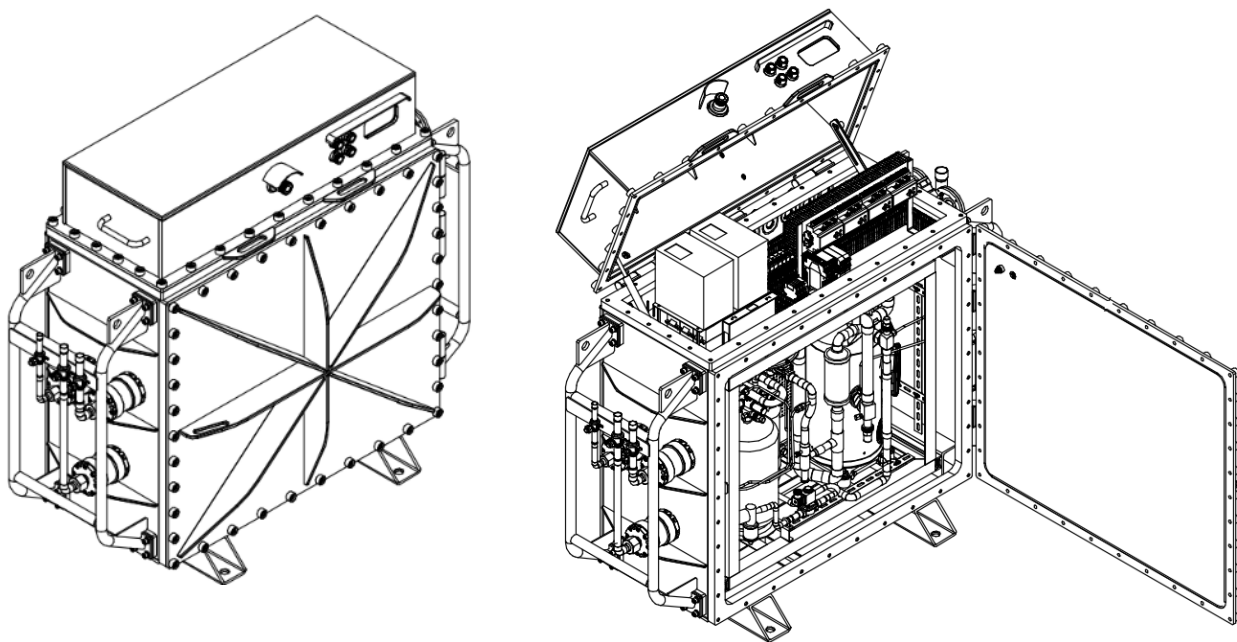


Рисунок 5.5 – Конструкторская проработка холодильной машины КШв-15 для системы СКВ-8

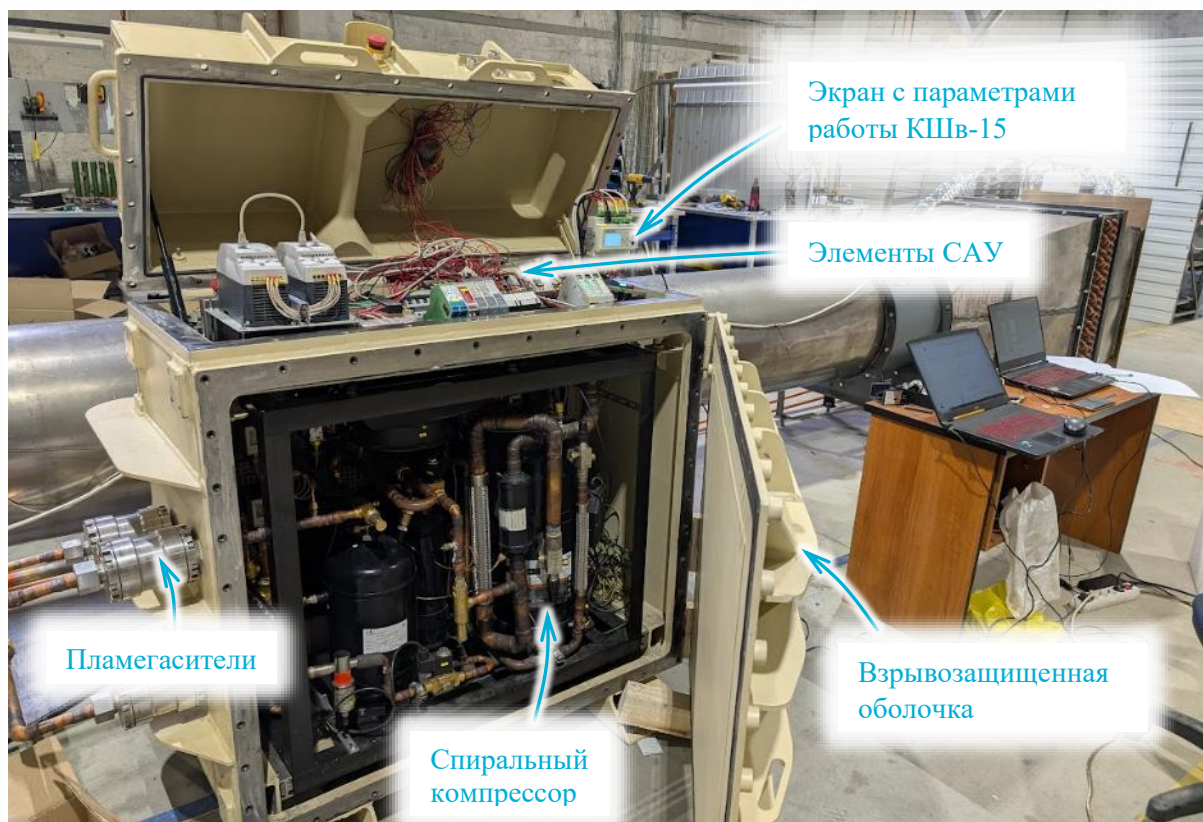


Рисунок 5.6 – Общий вид холодильной машины КШв-15 производства НПО «Аэросфера»

Основные элементы изделия КШв-15 заключены во взрывозащищенную оболочку, обеспечивающую безопасную эксплуатацию в условиях подземных калийных

рудников, для которых характерны газовыделения из породного массива. В состав холодильной машины входят спиральный компрессор, блок автоматического управления работой оборудования, система магистралей хладоносителя и элементы регулирования подачи хладоносителя. Основной сложностью при проектировании подобного оборудования является отсутствие компрессоров малой мощности во взрывозащищенном исполнении. Как следствие компрессорное оборудование устанавливается внутрь взрывозащищённой оболочки. В связи с этим для безопасного подвода магистрали с хладоносителем к компрессорному оборудованию используются пламегасители, которые позволяют в случае возникновения ударной волны выпустить созданное давление наружу, при этом полностью предотвращая возникновение искрообразования за пределами оболочки холодильной машины КШв-15.

Система управления холодильной машиной, представленная на рисунке 5.7, позволяет обеспечивать поддержание заданных параметров по температуре подаваемого в призабойное пространство воздуха. Помимо этого, оборудование оснащено системой защиты компрессора от перегрузок и возникновения аварийных режимов.

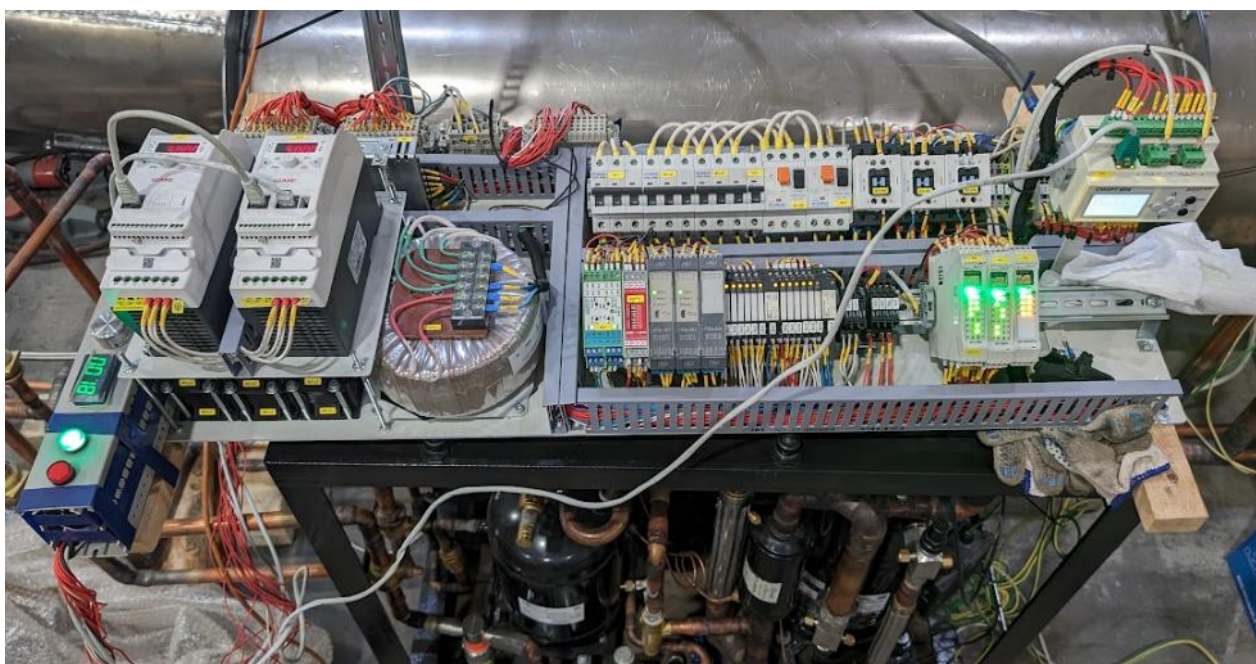


Рисунок 5.7 – Элементы, обеспечивающие автоматическое управление проветриванием холодильной машиной КШв-15

В собранном виде холодильная машина имеет следующие габариты:

- длина от 1700 мм до 2000 мм;
- ширина от 700 мм до 1000 мм;
- высота от 1200 мм до 1500 мм.

Представленные размеры холодильной машины характеризуют ее как достаточно компактную, пригодную для использования при разработке калийных месторождений проходческо-очистными комплексами.

С целью подтверждения проектных характеристик холодильной машины, которая в последующем станет частью системы СКВ–8, выполнены заводские испытания оборудования. Для испытаний разработан стенд, схема которого представлена на рисунке 5.8.

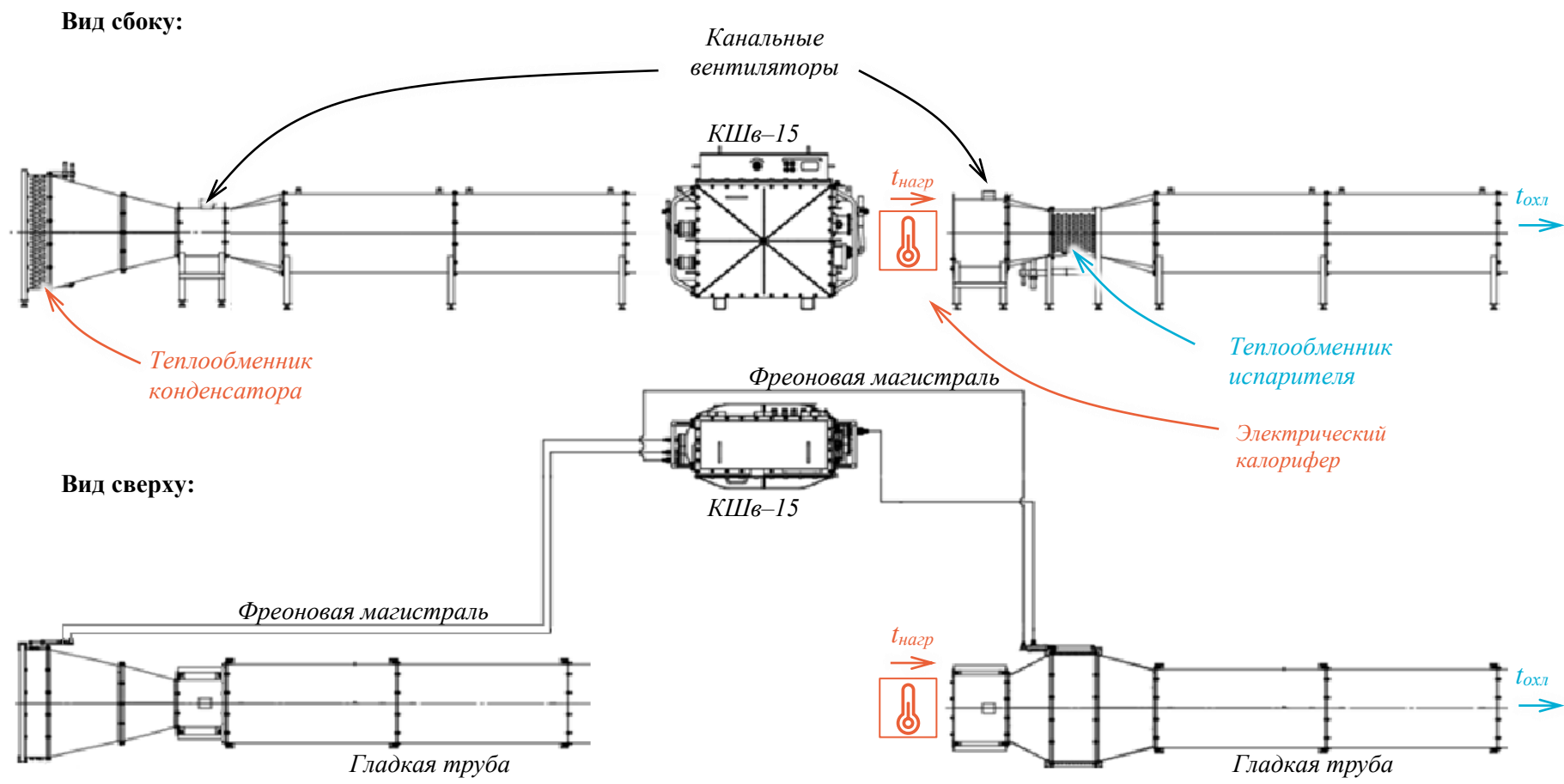


Рисунок 5.8 – Испытательный стенд для холодильной машины КШВ-15

Конструкция испытательного стенда позволяет выполнять комплексные исследования в части подтверждения тепловых характеристик установки при разных режимах работы, имитируя при этом разные условия ее эксплуатации.

Испытательный стенд 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 к нагретому воздуху 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 (рисунок 5.9), а также управление режимами работы спирального компрессора вентиляторов и регулируемых клапанов.

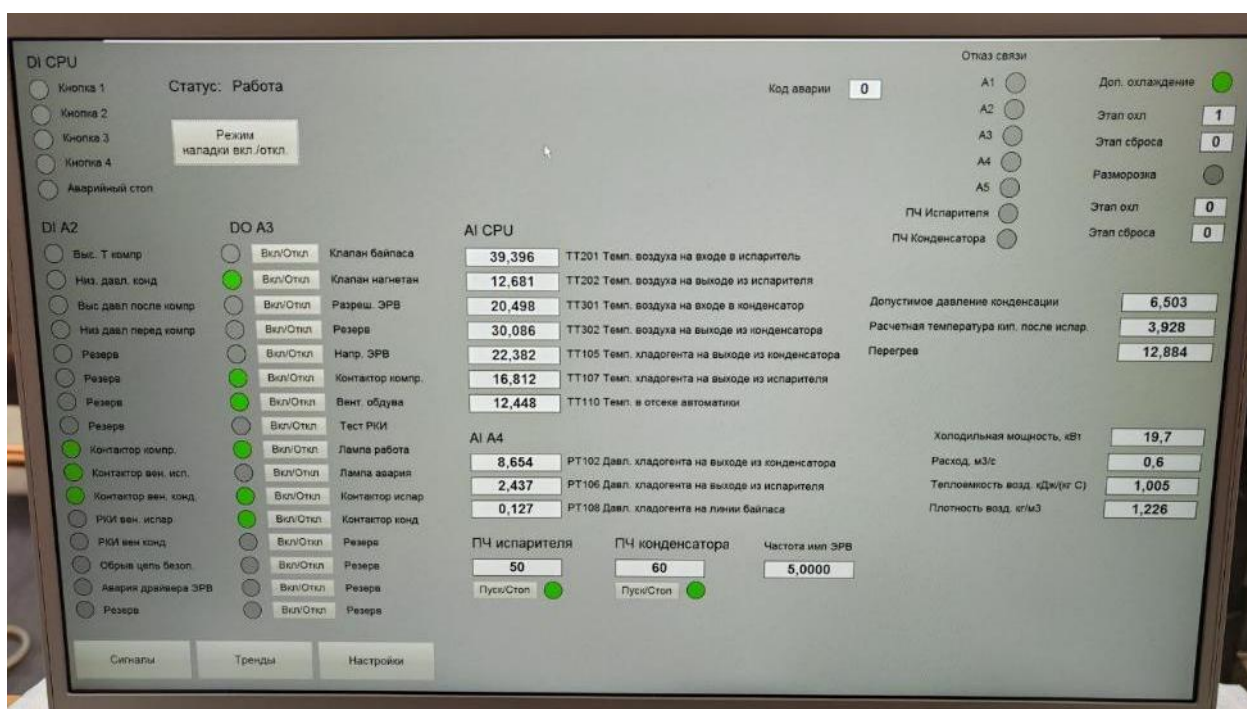


Рисунок 5.9 – Визуализация данных, полученных с датчиков стенда

Главной задачей для подтверждения проектной мощности оборудования являлось обеспечение перепада температур на входе и выходе из блока испарителя. Для того, чтобы приблизить условия проведения экспериментов к условиям подземного калийного рудника Гремячинского ГОК, испытания проводились летом при высоких температурах

окружающего воздуха (не менее 26 °С). В период пониженных температур перед блоком конденсатора устанавливался дополнительный источник нагрева, мощностью не менее 10 кВт, в виде тепловой пушки, либо другого стенда, оснащенного системой калориферов.

Общий вид стенда и организация подачи теплового воздуха представлены на рисунках 5.10 и 5.11, соответственно.



Рисунок 5.10 – Общий вид разработанного испытательного стенда



Рисунок 5.11 – Источник нагрева (электрический калорифер) перед блоком испарителя и выходная труба с нагретым воздухом из блока конденсатора

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 заключалась в определении энтальпий воздуха «до» и «после» прохождения воздухоохладителя, роль которого в данном случае играет испарительный блок. Определение параметров воздуха определялось с помощью термогигрометра Fluke 971. После измерения температуры и влажности полученные точки наносятся на *i-d* диаграмму и определяется разность энтальпий. На рисунке 5.12 приведен пример определения разности энтальпий.

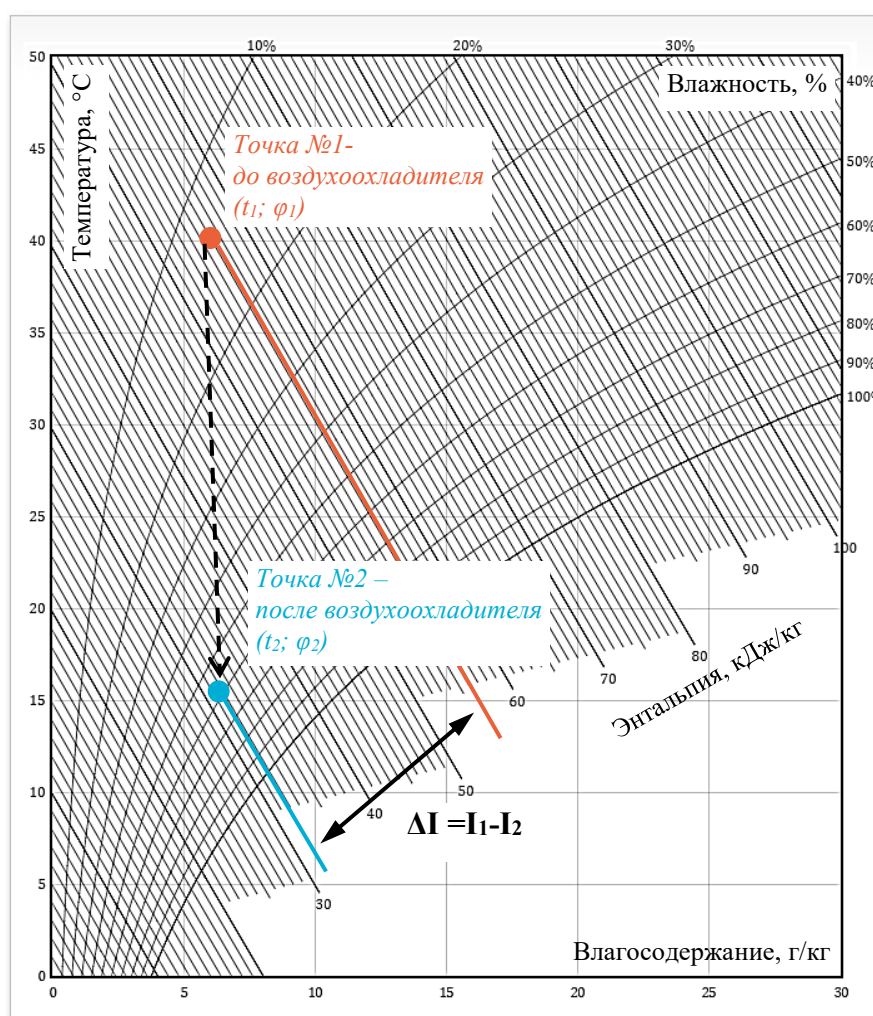


Рисунок 5.12 – Пример определения разности энтальпий на *i-d* диаграмме

Точка №1 соответствует параметрам воздуха на входе в воздухоохладитель с температурой  $t_1$  и относительной влажностью  $\varphi_1$ , а точка №2 параметрам охлажденного воздуха на выходе из воздухоохладителя с температурой  $t_2$  и относительной влажностью  $\varphi_2$ . Соединяющая прямая линия отражает процесс охлаждения и осушения воздуха. Разность энтальпий  $I_1$  и  $I_2$  соответствует количеству теплоты, отводимому от

воздушного потока при проходе через теплообменник блока испарителя. При этом стоит обращать внимание на то, как изменяется параметр влагосодержания, и стремиться достичь таких условий, при которых влага не будет конденсироваться на поверхности теплообменника.

Для выполнения расчетов также необходимо выполнить замеры количества воздуха, проходящего по трубопроводу блока испарителя, и вычисления массового расхода  $G_B$ :

$$G_B = \rho \cdot V \cdot S, \quad (5.4)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – скорость воздуха, м/с;  $S$  – площадь трубопровода испарительного блока, м<sup>2</sup>.

При этом плотность воздуха определяется по следующей формуле:

$$\rho = \frac{P}{287 \cdot T}, \quad (5.5)$$

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

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

$$N = \Delta I \cdot G_B, \text{ кВт}. \quad (5.6)$$

На следующем этапе исследований выполнен анализ полученных результатов заводских испытаний холодильной машины КШв–15, разработанной для локальной системы кондиционирования воздуха СКВ–8. Испытания проводились в несколько этапов с выполнением доработки алгоритмов управления оборудования и при разных условиях. Результаты приведены в таблицах 5.3 - 5.8.

Таблица 5.3 — Результаты заводских испытаний холодильной машины №1

Параметр		Величина
Дата выполнения замера №1		13.06.2024
Уставка по температуре		16 °С
Атмосферное давление		100720 Па
Плотность воздуха		1,167 кг/м <sup>3</sup>
Скорость воздуха в трубе блока испарителя		4,6 м/с
Сечение трубы		0,126 м <sup>2</sup>
Массовый расход воздуха		0,67 кг/с
Замер перед испарителем	температура	36,0 °С
	влажность	22,5 %
Замер после испарителя	температура	19,0 °С
	влажность	38,8 %
Разность энтальпий		19,0 кДж/кг
<b>Замеренная мощность</b>		<b>12,8 кВт</b>

Таблица 5.4 — Результаты заводских испытаний холодильной машины №2

Параметр		Величина
Дата выполнения замера №2		13.06.2024
Уставка по температуре		10 °С
Атмосферное давление		100720 Па
Плотность воздуха		1,167 кг/м <sup>3</sup>
Скорость воздуха в трубе блока испарителя		5,0 м/с
Сечение трубы		0,126 м <sup>2</sup>
Массовый расход воздуха		0,73 кг/с
Замер перед испарителем	температура	38,8 °С
	влажность	21,0 %
Замер после испарителя	температура	18,6 °С
	влажность	54,0 %
Разность энтальпий		25,0 кДж/кг
<b>Замеренная мощность</b>		<b>18,3 кВт</b>

Таблица 5.5 — Результаты заводских испытаний холодильной машины №3

Параметр		Величина
Дата выполнения замера №3		21.03.2025
Уставка по температуре		20 °С
Атмосферное давление		100830 Па
Плотность воздуха		1,183 кг/м <sup>3</sup>
Скорость воздуха в трубе блока испарителя		4,4 м/с
Сечение трубы		0,126 м <sup>2</sup>
Массовый расход воздуха		0,65 кг/с
Замер перед испарителем	температура	29,5 °С
	влажность	10,0 %
Замер после испарителя	температура	19,1 °С
	влажность	18,8 %
Разность энтальпий		11,0 кДж/кг
<b>Замеренная мощность</b>		<b>7,2 кВт</b>

Таблица 5.6 — Результаты заводских испытаний холодильной машины №4

Параметр		Величина
Дата выполнения замера №4		21.03.2025
Уставка по температуре		16 °С
Атмосферное давление		100830 Па
Плотность воздуха		1,183 кг/м <sup>3</sup>
Скорость воздуха в трубе блока испарителя		5,0 м/с
Сечение трубы		0,126 м <sup>2</sup>
Массовый расход воздуха		0,74 кг/с
Замер перед испарителем	температура	24,0 °С
	влажность	14,0 %
Замер после испарителя	температура	8,0 °С
	влажность	37,3 %
Разность энтальпий		17,0 кДж/кг
<b>Замеренная мощность</b>		<b>12,6 кВт</b>

Таблица 5.7 — Результаты заводских испытаний холодильной машины №5

Параметр		Величина
Дата выполнения замера №5		02.04.2025
Уставка по температуре		14 °С
Атмосферное давление		100225 Па
Плотность воздуха		1,180 кг/м <sup>3</sup>
Скорость воздуха в трубе блока испарителя		5,0 м/с
Сечение трубы		0,126 м <sup>2</sup>
Массовый расход воздуха		0,74 кг/с
Замер перед испарителем	температура	27,0 °С
	влажность	19,8 %
Замер после испарителя	температура	9,6 °С
	влажность	46,0 %
Разность энтальпий		19,8 кДж/кг
<b>Замеренная мощность</b>		<b>15,0 кВт</b>

Таблица 5.8 — Результаты заводских испытаний холодильной машины №6

Параметр		Величина
Дата выполнения замера №6		02.04.2025
Уставка по температуре		14 °С
Атмосферное давление		100225 Па
Плотность воздуха		1,180 кг/м <sup>3</sup>
Скорость воздуха в трубе блока испарителя		5,0 м/с
Сечение трубы		0,126 м <sup>2</sup>
Массовый расход воздуха		0,74 кг/с
Замер перед испарителем	температура	39,6 °С
	влажность	10,8 %
Замер после испарителя	температура	16,0 °С
	влажность	30,3 %
Разность энтальпий		27,0 кДж/кг
<b>Замеренная мощность</b>		<b>20,0 кВт</b>

На рисунке 5.13 приведена i-d диаграмма с полученными результатами заводских испытаний оборудования. Точки, представленные на диаграмме, пронумерованы в соответствии с замераами, описанными в таблицах 5.3 - 5.8 и выделены одинаковыми цветами.

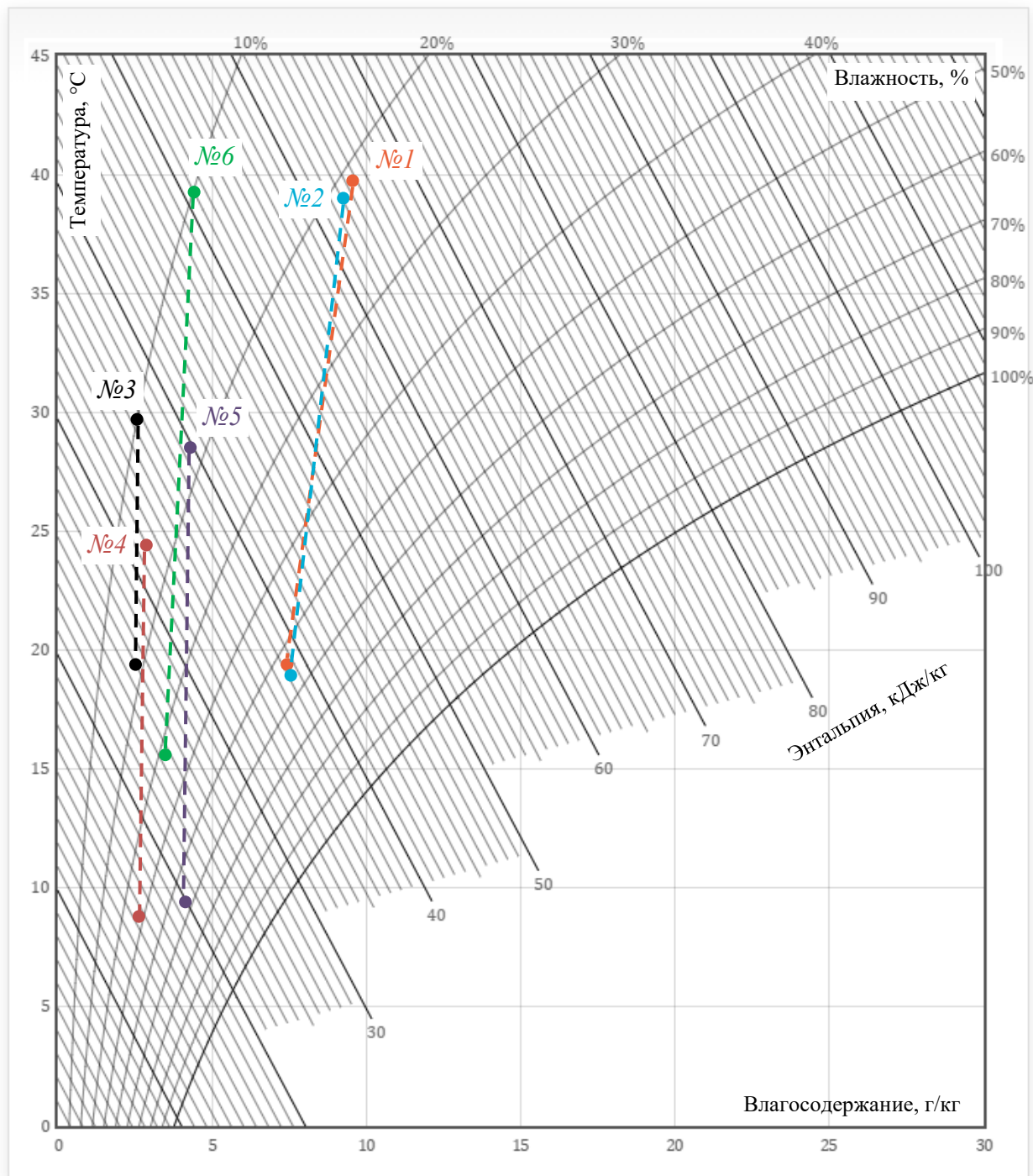


Рисунок 5.13 – Пример определения разности энтальпий на i-d диаграмме

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. Это подтверждается тем, что штриховые линии располагаются практически вертикально, за исключением первых

двух экспериментов, после которых были скорректированы режимы работы оборудования. По результатам испытаний выдана рекомендация о том, что при реализации установки в подземном руднике система должна быть оснащена датчиками температуры и влажности. При этом алгоритмы системы управления должны быть настроены таким образом, чтобы не допускать выделения влаги. Замеры при испытании №5 показали, что холодильная машина способна выдавать проектную холодильную мощность без процесса конденсации на поверхности теплообменника.

С увеличением уставки температуры в сторону понижения требуемой на выходе из испарителя температуры, наблюдается рост энтальпии воздушного потока и, соответственно, рост холодильной мощности. Максимальное снижение  $\Delta I$  составило 21 кДж/кг при уставке 8 °С, а мощность при данном режиме составила 20 кВт. Минимальные значения  $\Delta I = 11$  кДж/кг зафиксированы при уставке 20 °С, что согласуется с холодопроизводительностью равной 7 кВт.

Таким образом результаты заводских испытаний показали, что разработанная холодильная машина КШв–15 соответствует требованиям, заложенным при ее проектировании. На базе данной холодильной машины возможно реализовать систему локального кондиционирования воздуха в призабойном пространстве тупиковой комбайновой выработки СКВ–8. При этом в основу системы кондиционирования ляжет всасывающий способ проветривания, который поможет снизить как тепловую нагрузку в балансе, так и нормализовать пылевую обстановку [20,21]. Результаты опытно-промышленных испытаний всасывающего способа проветривания опубликованы авторам в работах [35,62,21].

### **5.3 Выводы по разделу**

На основании результатов теоретических и натурных исследований разработана концепция системы локального кондиционирования воздуха СКВ-8 для тупиковых комбайновых выработок. В основу предлагаемой системы предложен всасывающий способ проветривания, позволяющий снизить тепловую нагрузку в призабойном пространстве, а также улучшить пылевую обстановку в тупиковой выработке [21,35].

Предложена методика проектирования системы локального кондиционирования воздуха, которая позволяет разрабатывать системы как для действующих рудников, так и для проектируемых. Подходы отличаются методом сбора исходных данных. В случае уже эксплуатируемого рудника исходные данные собираются путем проведения натурных исследований, а в случае проектируемых выработок часть исходных данных рассчитывается на синтезированной модели.

Итогом выполненных проработок является разработанная холодильная машина КШв–15, на базе которой предлагается развернуть систему кондиционирования СКВ–8 для тупиковых комбайновых выработок. Оборудование выполнено на базе производства НПО «Аэросфера» во взрывозащищенном исполнении в соответствии с требованиями нормативной документации [54,53,9]. Результаты заводских испытаний разрабатываемого оборудования показали соответствие проектным требованиям. Полученные значения холодопроизводительности машины КШв–15 варьировались от 7 кВт до 20 кВт, что соответствует общей предлагаемой концепции системы СКВ–8. Конструктивные особенности холодильной машины, в частности ее компактные габаритные размеры, позволяют использовать системы без значительных модернизаций инфраструктуры рабочих зон.

Практическая реализация полученных результатов подтверждает целесообразность использования парокompрессионных машин малой мощности в условиях неблагоприятной тепловой обстановки в призабойном пространстве тупиковых комбайновых выработок. Применение подобной системы способствует снижению тепловой нагрузки на рабочем месте машиниста комбайна, что в свою очередь повышает уровень безопасности, а также позволяет увеличивать производительность проходческо-очистного комплекса за счет снижения времени технологических простоев. Таким образом, разработанная установка КШв–15 и методика её проектирования могут быть рекомендованы к использованию при проектировании и модернизации систем вентиляции и кондиционирования воздуха на предприятиях калийной промышленности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена решению научно-прикладной задачи, направленной на обоснование способа управления тепловым режимом на рабочем месте 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 ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Березовская, А. В. Факторы опасности здоровью шахтеров и меры противодействия этим рискам / А. В. Березовская, А. И. Фомин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 5 (131). – С. 47.
- 2 Бокий, Б. В. Методика обоснования параметров способа снижения температуры воздуха шахтной атмосферы призабойной зоны тупиковых подготовительных выработок / Б. В. Бокий, В. Р. Алабьев, С. В. Тынына // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2014. – № 12 (115). – С. 4–11.
- 3 Бородавкин, Д. А. Моделирование нестационарного тепломассопереноса в длинном очистном забое с учетом особенностей нагрева и охлаждения горного оборудования / Д. А. Бородавкин, А. В. Зайцев, М. А. Семин // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 7. – С. 7-15. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-7-7-15. – EDN MUUTWF.
- 4 Бородавкин, Д. А. Расчет и управление нестационарным тепловым режимом рабочих зон длинных очистных забоев (на примере Старобинского месторождения калийных солей) : дис. ... канд. техн. наук. / Бородавкин Д. А.; – Пермь, 2024. – 133 с.
- 5 Воропаев, А. Ф. Управление тепловым режимом в глубоких шахтах / А. Ф. Воропаев. – Москва : Госгортехиздат, 1961. – 248 с.
- 6 Вяльцев, М. М. Прогноз и регулирование термонапряженного состояния горных выработок //М.: Недра. – 1988.
- 7 Гендлер, С. Г. Тепловой режим подземных сооружений / С. Г. Гендлер. – Ленинград : ЛГИ им. Г. В. Плеханова, 1987. – 102 с.
- 8 ГОСТ 12.1.005-88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Введ. 1989-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 60 с.
- 9 ГОСТ 31442-2011 (EN 50303:2000). Оборудование группы I, уровень взрывозащиты Ма, для применения в среде, опасной по воспламенению рудничного газа и/или угольной пыли : межгос. стандарт / введ. в действие ФАУ «Росстандарт» 15.02.2013. – М. : Стандартиформ, 2013.
- 10 Дмитриев, Л.П. Физические свойства горных пород при высоких температурах / Л. П. Дмитриев, Л. С. Кузьяев, В. С. Ямщиков. - М.: Недра, 1969.
- 11 Дядькин, Ю. Д. О методах тепловых расчетов рудничного воздуха / Ю. Д. Дядькин // Научные доклады высшей школы. Серия «Горное дело». – 1958. – № 1.
- 12 Жарков, М. А. Калийные соли. Ресурсы, добыча, международная торговля / М. А. Жарков, А. С. Соколов // Горная промышленность. – 1999. – № 6.

- 13 Зайцев, А. В. Исследование температуры массива горных пород березовского рудника ОАО «Беларуськалий» / А. В. Зайцев, Д. А. Бородавкин, С. А. Бублик, К. М. Агеева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 7. – С. 76–85.
- 14 Зайцев, А. В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников : дис. ... д-ра техн. наук. / Зайцев А. В.– Пермь, 2019. – 247 с.
- 15 Зайцев, А. В. Нормирование температурного режима в условиях нагревающего микроклимата горных выработок / А. В. Зайцев, Д. А. Бородавкин, И. В. Поляков, Е. М. Власова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 145–158.
- 16 Зайцев, А. В. Обеспечение безопасных условий труда в подземных горных выработках по фактору микроклимата: новые результаты и направления исследований / А. В. Зайцев, И. В. Поляков // Горное эхо. – 2021. – № 3. – С. 89–96.
- 17 Зайцев, А. В. Обеспечение безопасных условий труда по фактору микроклимата для условий глубокого калийного рудника / Зайцев А. В., Бородавкин Д. А., Поляков И. В. // Горное эхо. – 2020. – № 1. – С. 72–79.
- 18 Зайцев, А. В. Ресурсосберегающие решения в системах кондиционирования рудничного воздуха / А. В. Зайцев, Ю. А. Ключкин // Проблемы недропользования. – 2015. – № 2 (5). – С. 26–31.
- 19 Ибраев, А. М. Термодинамика и теоретические основы холодильной техники / А. М. Ибраев, А. А. Нургалиев, Р. Р. Сабитов. – Казань : КНИТУ, 2012. – 102 с.
- 20 Исаевич, А. Г. Научное обоснование методологии управления пылевой обстановкой в горных выработках калийных рудников : дис. ... д-ра техн. наук. / Исаевич А. Г. – Пермь, 2023. – 266 с.
- 21 Исаевич, А. Г. Оценка эффективности различных вариантов проветривания тупикового комбайнового забоя по пылевому фактору в условиях глубокого калийного рудника / А. Г. Исаевич, А. Е. Суханов, М. С. Желнин, И. В. Поляков // Горный журнал. – 2023. – № 11. – DOI 10.17580/gzh.2023.11.07.7
- 22 Казаков, А. П. Проветривание при работе комбайнов «Урал-10КС» / А.П. Казаков, Т.Т. Сидельникова, Л.В. Кузнецов // Безопасность труда в пром-сти.– 1988.– №2.– С. 42–43.
- 23 Казаков, Б. П. Адвективное проветривание тупиковой выработки / Б. П. Казаков, А. В. Шалимов, А. Г. Исаевич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 57. – С. 76–82.

- 24 Казаков, Б. П. Формирование и нормализация микроклимата подземных рудников при разработке месторождений калийных солей : дис. ... д-ра техн. наук. / Казаков Б. П. ;– Пермь, 2001.
- 25 Казаков, Б.П. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников / Б. П. Казаков, Е. В. Колесов, Е. В. Накаряков, А. Г. Исаевич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 5–33. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_6\_0\_5. – EDN ATXUYB.
- 26 Киров, С.А. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения. Учебное пособие / С.А. Киров. – Москва : ООП Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. – 52 с.
- 27 Комплексное освоение охрана недр при разработке калийных руд Соликамского района. Совершенствование вентиляции, борьба с пылью и газами в калийных рудниках ПО «Сильвинит» / Отчет о НИР № гос. рег.01860069774. Рук. Файнбург Г.З. // ПермьПИ, 1990. – 78 с.
- 28 Кочнев, К. В. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха / К. В. Кочнев. – Киев : Изд-во АН УССР, 1962.
- 29 Красноштейн, А. Е. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников / А. Е. Красноштейн, Г. З. Файнбург. – Екатеринбург : Типография изд-ва «Уральский рабочий», 1992. – 243 с.
- 30 Кристалинский, В. Р. О решении задач математической физики в системе Wolfram Mathematica / В. Р. Кристалинский, Р. Е. Кристалинский // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – Т. 15, № 4. – С. 981–991.
- 31 Куренкова, Г. В. Микроклимат производственных помещений : учебное пособие для студентов / Г. В. Куренкова, Е. В. Жукова, Е. П. Лемешевская ; ФГБОУ ВО «ИГМУ» Минздрава России, Кафедра профильных гигиенических дисциплин. – Иркутск : ИГМУ, 2020. – 52 с.
- 32 Левин, Л. Ю. Моделирование, расчет и управление тепловым режимом шахт и рудников при освоении месторождений полезных ископаемых на больших глубинах / Л. Ю. Левин, А. В. Зайцев // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – Т. 507, № 2. – С. 363–372. – DOI 10.31857/S2686739722601636. – EDN ZGICBV.
- 33 Левин, Л. Ю. Нормализация микроклиматических условий горных выработок при отработке глубокозалегающих запасов калийных рудников / Л. Ю. Левин, А. В. Зайцев, С. В. Бутаков, М. А. Семин // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 97–102.

- 34 Левин, Л. Ю. Разработка систем управления тепловым режимом подземных рудников / Л. Ю. Левин, А. В. Зайцев // Вестник государственной экспертизы. – 2020. – № 4 (17). – С. 18–27. – EDN VFZKYS.
- 35 Левин, Л. Ю. Экспериментальные исследования зависимости пылевой обстановки в тупиковой выработке от применяемого способа проветривания при механизированной добыче калийных руд / Л. Ю. Левин, А. Е. Суханов, А. Г. Исаевич, И. И. Козунин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 10. – С. 35–50. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_10\_0\_35.
- 36 Левин, Л.Ю. Исследование тепловых процессов в атмосфере рабочего пространства машиниста комбайна на глубоком калийном руднике при местном кондиционировании воздуха / Л.Ю. Левин, А.Е. Суханов, С.В. Мальцев, М.Л. Бартоломей, И.А. Пантелеев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2026. Т. 337. – No 2. – С. 38–49. DOI 10.18799/24131830/2026/2/4881
- 37 Ликсович, А. В. Теплопередача / А. В. Ликсович, А. Ю. Жданов. – Москва : Высшая школа, 1964. – 254 с.
- 38 Лискова, М. Ю. Влияние микроклиматических условий на горнорабочих в выработках глубоких горизонтов калийных рудников / М. Ю. Лискова, Н. Л. Вишневская, Л. В. Плахова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 9. – С. 219–230.
- 39 Мааке, В. Учебник по холодильной технике / В. Мааке, Г. Ю. Эккерт, Ж. Л. Кошпен. – Москва : Изд-во МГУ, 1998. – 1160 с.
- 40 Максимов, А. Б. Обоснование параметров породоразрушающих исполнительных органов и погрузочного оборудования проходческо-очистных комбайнов «Урал 20Р» : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Максимов А. Б. – 2019.
- 41 Мартынов, А. А. Системы и средства локального охлаждения рудничного воздуха в горных выработках / А. А. Мартынов, А. К. Яковенко, А. Б. Олексюк // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – Т. 7. – С. 132–140.
- 42 Медведев, Б. И. Регулирование тепловых условий в лавах путем распределенной подачи охлажденного воздуха / Б. И. Медведев // Труды семинара по горной теплотехнике. Вып. 2. – Киев : Изд-во АН УССР, 1950.
- 43 Медведев, И. И. Аэрология калийных рудников / И. И. Медведев, А. Е. Красноштейн. – Свердловск : УрО АН СССР, 1990. – 252 с.

- 44 Методика измерений расхода воздуха в подземных горных выработках при проведении воздушно-депресссионных съемок : ФР.1.29.2022.42901 : утв. 28 февраля 2022 г. : № 00000249.02.22-30058-13 / разработчик «ГИ УрО РАН». – 2022.
- 45 Методика измерений температуры на участках подземных горных выработок при проведении термовлажностной съемки : ФР.1.30.2022.42899 : утв. 28 февраля 2022 г. : № 00000248.02.22-30058-13 / разработчик «ГИ УрО РАН». – 2022 г.
- 46 Методика проведения специальной оценки условий труда // Утверждена Приказом Министерства труда и социальной защиты РФ № 33н от 24.01.2014. — 2020.
- 47 Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд., стер. – Москва : Энергия, 1977. – 344 с.
- 48 Овсянкин, А.Д. Борьба с пылью на проходческих комбайнах с помощью водовоздушных завес / А.Д. Овсянкин // Технология и безопасность горных работ. 1974. – №. 150.
- 49 Ольховский, Д. В. Нормализация микроклиматических параметров тупиковых горных выработок глубоких рудников : дисс. ... канд. техн. наук./ Ольховский Д. В. – Пермь, 2024. – 125 с.
- 50 Ольховский, Д. В. Способы нормализации микроклимата в глубоких протяженных тупиковых выработках / Д. В. Ольховский, А. В. Зайцев, А. В. Шалимов, А. А. Давыдов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 12. – С. 200–210. – DOI 10.18799/24131830/2021/12/3210. – EDN PXQWLS.
- 51 Пересторонин, М. О. Экспериментальное исследование переходных тепловых режимов длинных очистных забоев / Пересторонин, М.О., Зайцев А.В., Семин М.А., Бородавкин Д.А. //Горные науки и технологии. – 2022. – Т. 7. – №. 1. – С. 37-48.
- 52 Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности: утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 г. № 534. – 2020.
- 53 Правила безопасности в угольных шахтах: утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 г. № 507. – 2020.
- 54 Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 г. № 505. – 2020.

- 55 Правила по обеспечению промышленной безопасности при разработке подземным способом месторождений каменной и калийных солей : утв. Постановлением МЧС Республики Беларусь от 14.12.2023 № 67. – 2024.
- 56 Руководство по эксплуатации «Вагон пневмоколесный самоходный грузовой В17К-03». – Копейск : АО «Копейский машиностроительный завод», 2016.
- 57 Руководство по эксплуатации «Комбайн проходческо-очистной «Урал-20Р-11» «Урал-20Р-12». – Копейск : ОАО «Копейский машиностроительный завод», 2019.
- 58 СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» : утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 2. – 2021.
- 59 СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» : утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 21.06.2016 № 81. – 2017.
- 60 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025695306 Российская Федерация. Программа "TES" : заявл. 13.11.2025 : опубл. 10.12.2025 / М. А. Семин, Д. С. Кормщиков, С. А. Бублик ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук. – EDN CDWECU.
- 61 Семенова, А. П. Теоретическое изучение теплопереноса в скважине и горном массиве применительно к задачам геотермии : дис. канд. физ.-мат. наук./ А. П. Семенова.– Москва, 2006. – 145 с.
- 62 Смирнов, А. Э. Исследование аэродинамического сопротивления вентиляционных трубопроводов при их эксплуатации в условиях калийных рудников / А. Э. Смирнов, А. Е. Суханов, С. В. Мальцев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 4. – С. 622–632. – EDN HBCWZN.
- 63 Соболев, Д. Высокотемпературные пластичные смазочные материалы / Д. Соболев, Д. Колесниченко // Территория Нефтегаз. – 2011. – № 12. – С. 74–77.
- 64 Суханов, А. Е. Использование перекрестной схемы резания для снижения пылевидных и необогатимых фракции при механизированной добыче калийной руды / А. Е. Суханов, Д. И. Шишлянников, А. Г. Исаевич // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 2. – С. 60–69. – DOI 10.18799/24131830/2023/2/3767.
- 65 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. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – Т. 1. – С. 218–220. – EDN SDHTSG.
- 66 Суханов, А. Е. Снижение уровня запыленности в тупиковой комбайновой выработке калийного рудника путем внедрения комбинированного способа проветривания / А. Е. Суханов, С. В. Мальцев // Горное эхо. – 2024. – № 3 (96). – С. 84–91. – DOI 10.7242/echo.2024.3.14.
- 67 Сычева, М. В. Влияние микроклимата производственных помещений на организм человека / М. В. Сычева, Т. А. Осипова, Т. Ю. Феклина // Профилактическая медицина как научно-практическая основа сохранения и укрепления здоровья населения : сборник научных трудов / под общ. ред. М. А. Поздняковой. – Нижний Новгород : Ремедиум Приволжье, 2018. – Вып. 5. – С. 78–85. – EDN VZKBBB.
- 68 Тетенькин, Д. Д. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году : государственный доклад / Д. Д. Тетенькин, Е. И. Петров. – Москва : МПР России, 2023.
- 69 Тошов, Ж.Б. Экспериментальное исследование динамических режимов работы электрических моторов ходовой части шахтных самоходных вагонов / Ж. Б. Тошов, Д. А. Рисмухамедов, Ф. Н. Туйчиев, А. Л. Хакбердиев // Universum: технические науки. – 2022. – № 3-6 (96). – С. 37–42.
- 70 Файнбург, Г. З. Анализ микроциркуляционных потоков между микроразонами в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания / Г.З. Файнбург, А.Г. Исаевич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – №. 3. – С. 58-73.
- 71 Файнбург, Г. З. Методы математического моделирования процессов теплопереноса в вентиляционных сетях шахт и рудников // Разработка соляных месторождений. – Пермь, 1978. – С. 47–55.
- 72 Файнбург, Г. З. Повышение эффективности проветривания тупиковых комбайновых выработок калийных рудников по пылевому фактору / Г.З. Файнбург., А.Г. Исаевич, А.В. Зайцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – №. 8. – С. 38-50.
- 73 Файнбург, Г.З. Опыт применения всасывающего способа проветривания комбайновых выработок на Верхнекамских калийных рудниках / Г.З. Файнбург, А.Д. Овсянкин, О.Я Вайсман, С.В. Шалаев // Совершенствование разработки соляных месторождений: межвузовский сборник научных трудов. – Пермь: Пермский политех. институт. – 1990. – С. 122–127

- 74 Цветов, Ф.Ф. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов / Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. // М.: Издательство МЭИ, 2005. – 550 с.
- 75 Шишлянников, Д. И. Совершенствование оборудования и режимов работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников как энергоэффективных объектов функционирования: дисс. ... д-ра техн. наук. – Санкт-Петербург, 2021. – 133 с.
- 76 Шишлянников, Д.И. Методика определения средневзвешенной производительности механизированных комбайновых комплексов калийных рудников / Д. И. Шишлянников, В. Ю. Зверев, А. К. Муравский, И. Е. Звонарев, И. А. Королев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 7. – С. 125–133.
- 77 Шувалов, Ю. В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера: Ресурсосберегающие системы / Ю. В. Шувалов. – Ленинград : Изд-во Ленинградского университета, 1988. – 196 с.
- 78 Щербань, А. Н. Научные основы расчёта и регулирования теплового режима глубоких шахт : в 2 т. / А. Н. Щербань, О. А. Кремнев. – Киев : Изд-во АН УССР, 1959. – Т. 1. – 430 с.
- 79 Щербань, А. Н. Основы теории и методы тепловых расчетов рудничного воздуха / А. Н. Щербань, О. А. Кремнев. – Москва : Углетехиздат, 1953.
- 80 Щербань, А.Н. Руководство по регулированию теплового режима шахт / А.Н. Щербань, О.А. Кремнев, В.Я. Журавленко – Изд-во 3-е, переработанное и дополненное — М.: Недра, 1977. — 359 с.
- 81 Adjiski, V. Determining optimal distance from outlet of auxiliary 521 forcing ventilation system to development of heading in underground mines / V. Adjiski, D. Mirakovski, Z. Despodov, S. Mijalkovski // Journal of Mining and Environment. – 2019. – Vol. 10, No. 4. – P. 821–832.
- 82 Ahmadi, M. H. Numerical and experimental investigation of air flow behavior and H<sub>2</sub>S gas emission through an inclined traversed tunnel / M. H. Ahmadi, M. H. Hekmat // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2021. – Vol. 43.– P. 1–15.
- 83 Amano, K. An improved method of predicting underground Climate / K. Amano, Y. Mizuta, Y. Hiramatsu // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts. – 1982. – № 19. – P. 31–83.
- 84 ANSYS Fluent Theory Guide, Release 18.0. Ansys. Inc.: Canonsburg, PA, USA.

- 85 Branny, M. Experimental and numerical analysis of air flow in a dead-end channel / M. Branny, M. Jaszczur, W. Wodziak, J. Szmyd // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 745, No. 3. – Art. 032045.
- 86 Brodny, J. Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining: a systematic literature review / Brodny J., Tutak M. // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2021. – Vol. 151. – P. 373–400.
- 87 Caciora, T. Comprehensive analysis of classroom microclimate in context to health-related national and international indoor air quality standards / T. Caciora, A. Ilies, Z. Berdenov, H. Al-Hyari, D. Ilies, B. Safarov // *Frontiers in Public Health*. – 2024. – Vol. 12. – Art. 1440376.
- 88 Chang, P. Minimizing DPM pollution in an underground mine by optimizing auxiliary ventilation systems using CFD / P. Chang, G. Xu, F. Zhou, B. Mullins, S. Abishek, D. Chalmers // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2019. – Vol. 87. – P. 112–121.
- 89 Chen, X. Research on the dust diffusion and pollution behaviour of dynamic tunneling in header excavators based on dynamic mesh technology and field measurement / X. Chen, H. Zhang, S. Ge, C. Deng, C. Fan, G. Ma, W. Li // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, Iss. 23. – Art. 8945
- 90 Chowdhury, I. A. State-of-the-art CFD simulation: a review of techniques, validation methods, and application scenarios // *Journal of Recent Trends in Mechanics*. – 2024. – P. 45–53.
- 91 Garcia, M. A. Comparative analysis of hydraulic refrigeration and mechanical vapour compression water cooling technologies in designing a technical system for oysters conservation / M. A. Garcia [et al.] // *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. – 2021. – Vol. 93, No. 1. – DOI 10.1590/0001-3765202120190505.
- 92 Greth, A. A review of cooling system practices and their applicability to deep and hot underground US mines / A. Greth, P. Roghanchi, C. Kocsis // *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. – Golden, 2017. – Vol. 11. – P. 1–9.
- 93 Hargreaves, D. M. The computational modeling of the ventilation flows within a rapid development drivage / D. M. Hargreaves, I. S. Lowndes // *Tunnelling and underground space technology*. – 2007. – Vol. 22, No. 2. – P. 150–160.
- 94 He, D., Wang, X., Guo, C., Li, H., Zhang, Y. Study on the Influence of the Cage Lifting Piston Effect in Main Intake Shafts on Air Flow in Transportation Lanes. *Applied Sciences*, 2023, 13(3), 1419. DOI: 10.3390/app13031419.

- 95 Hhang, W., Xue, S., Tu, Q., Shi, G., & Zhu, Y. (2022). Study on the distribution characteristics of dust with.
- 96 Huang, R. Migration characteristics of CO under forced ventilation after excavation roadway blasting: a case study in a plateau mine / R. Huang, X. Shen, B. Wang, X. Liao // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 267. – Art. 122094.
- 97 Isaevich, A. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes / A. Isaevich, M. Semin, L. Levin, A. Ivantsov, T. Lyubimova // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14, Iss. 5. – Art. 3030.
- 98 Johra, H. Overview of the Coefficient of Performance (COP) for conventional vapour-compression heat pumps in buildings. – 2022.
- 99 Kays, W. M. (1994). Turbulent Prandtl Number—Where Are We? *Journal of Heat Transfer*, 116(2), 284. doi:10.1115/1.2911398
- 100 Lasaga, A.C. Geospeedometry: an extension of geothermometry. Kinetics and equilibrium in mineral reactions. New York, Springer Publ., 1983. pp. 81–114
- 101 Levin, L. Numerical analysis of the impact of variable borer miner operating modes on the microclimate in potash mine working areas / L. Levin, M. Semin, S. Maltsev, R. Luzin, A. Sukhanov // *Computation*. – 2025. – Vol. 13, Iss. 4. – Art. 85. – DOI 10.3390/computation13040085.
- 102 Li, Z. Increasing oxygen mass fraction in blind headings of a plateau metal mine by oxygen supply duct design: a CFD modelling approach / Z. Li, S. Zhao, R. Li, Y. Huang, Y. Xu, P. Song // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2020. – Vol. 2020. – Art. 8541909. – DOI 10.1155/2020/8541909.
- 103 Lin, C.-J. Study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system / Lin C.-J., Yang C.-W., Hsu C.-C. // *Applied Thermal Engineering*. – 2008. – Vol. 28, No. 3. – P. 372–385. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2007.06.004.
- 104 Mackay, L. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining / L. Mackay, S. J. Bluhm, J. Van Rensburg // *The 4th International Platinum Conference: Platinum in Transition ‘Boom or Bust’*: proceedings, Sun City, South Africa, 2010. – pp. 285–292
- 105 McPherson, M.J. *Subsurface ventilation and Environmental engineering*. — Chapman & Hall. — 2009. — 824 p
- 106 McPherson, M.J. *Subsurface ventilation engineering*, 2007.

- 107 Mrinal, K. R. A transient 3D CFD model of a progressive cavity pump / Mrinal K. R., Siddique M. H., Samad A // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. – 2016. – Vol. 49873. – P. V009T24A009.
- 108 Obracaj, D. Study on methane distribution in the face zone of the fully mechanized roadway with overlap auxiliary ventilation system / D. Obracaj, M. Korzec, P. Deszcz // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, Iss. 19. – Art. 6379.
- 109 Occupational exposure to hot environments. – Revised Criteria, NIOSH. – 1986.
- 110 Olkhovsky, D. Study on the influence of radiation heat transfer on microclimatic parameters in the blind heading of a deep potash mine / Olkhovsky D., Zaitsev A., Bublik S. // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2024. – Vol. 199. – Art. 108904.
- 111 Owens, B. Mining: Extreme prospects / B. Owens // *Nature*. – 2013. – Vol. 495. – P. 4–6.
- 112 Parmar, M. S., Hayhurst A. N. The heat transfer coefficient for a freely moving sphere in a bubbling fluidised bed / M. S. Parmar, A. N. Hayhurst // *Chemical Engineering Science*. – 2002. – Vol. 57, № 17. – P. 3485–3494.
- 113 Powell, R. Optimal geothermometry and geobarometry / R. Powell, T. Holland // *American Mineralogist*. – 1994. – Vol. 79, № 1–2. – P. 120–133.
- 114 Roghanchi, P. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by re-designing the auxiliary ventilation system: a case study / P. Roghanchi, K. C. Kocsis // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2017. – Vol. 8, № 4. – P. 280–293.
- 115 Sahu, A. Coal dust monitoring and computational simulations of dust dispersion in continuous miner development heading through auxiliary ventilation systems / A. Sahu, D. P. Mishra // *Current Science*. – 2022. – Vol. 122, № 4. – P. 419.
- 116 Semin, M., Analyzing the impact of heat emissions from 513 the borer miner on the efficiency of the exhaust ventilation system in a blind heading / M. Semin, A. Ivantsov, T. Lyubimova, A. Isaevich, A. Sukhanov. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2024. – Vol. 235. – Art. 126183.
- 117 Sukhanov, A. E. Improvement of Ural-20R borer miner loading augers / A. E. Sukhanov, D. I. Shishlyannikov, D. S. Kormshchikov // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – T. 266. – C. 04005. – DOI 10.1051/e3sconf/202126604005
- 118 Sukhanov, A., Optimization of the Combined Ventilation System for Dust Reduction in Blind Headings of Potash Mines / A. Sukhanov, S. Maltsev, M. Semin, A. Isaevich, A. Starikov // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. – 2024. – Vol. 11, № 5. – P. 1236–1244. – DOI 10.18280/mmep.110512. – EDN JBPWEV.

- 119 Szlązak, N. An Evaluation of the Functioning of Cooling Systems in the Polish Coal Mine Industry / N. Szlązak, D. Obracaj, J. Swolkien // *Energies*. – 2018. – Vol. 11. – Art. 2267. – DOI 10.3390/en11092267.
- 120 Tutak, M. Analysis of the Impact of Auxiliary Ventilation Equipment on the Distribution and Concentration of Methane in the Tailgate / M. Tutak, J. Brodny // *Energies*. – 2018. – Vol. 11, № 11. – P. 3076.
- 121 Vives, J. Computational Fluid Dynamics (CFD) study to optimize the auxiliary ventilation system in an underground mine / j. Vives, M. Bascompta, J. Juan de Felip, L. Sanmiquel // *Dyna*. – 2022. – T. 89. – №. 221. – C. 84-91.
- 122 Wang, J. Heat hazard control in high-temperature tunnels: experimental study of coupled cooling with ventilation and partial insulation for synergistic geothermal extraction / J. Wang, Z. Li, G. Li, Y. Xu // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2023. – T. 20, № 3. – C. 1941.
- 123 Wang, Z., Respirable dust pollution characteristics within an underground heading face driven with continuous miner—A CFD modelling approach / Z. Wang, S. Li, T. Ren, J. Wu, H. Lin, H. Shuang // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 217. – P. 267–283.
- 124 Webber, R.C.W. A review of local and international heat stress indices, standards and limits with reference to ultra-deep mining / R. C. W. Webber, R. M. Franz, W. M. Marx, P. C. Schutte // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2003. – T. 103, № 5. – C. 313–323.
- 125 Webber, R.C.W., A review of local and international heat stress indices, standards and limits with reference to ultra-deep mining / R. C. W. Webber, R. M. Franz, W. M. Marx, P. C. Schutte // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2003. – T. 103, № 5. – C. 313–323.
- 126 Wu, R. Computational fluid dynamics modeling of rope-guided conveyances in two typical kinds of shaft layouts / R. Wu, Z. Zhu, G. Cao // *PloS One*. – 2015. – Vol. 10, № 2. – Art. e0118268.
- 127 Wüst, G. Thermometric measurement of depth / G. Wüst // *The International Hydrographic Review*. – 1933. – Vol. 10, № 1. – P. 28–49.
- 128 Xin, S. Application of Data Envelopment Analysis in the Ventilation and Cooling Efficiency Evaluation of Hot Development Headings / S. Xin, X. Han, S. Li, Y. Xiao, W. Yang // *Processes*. – 2022. – Vol. 10, № 7. – Art. 1375.
- 129 Yi, H. Applications of computational fluid dynamics for mine ventilation in mineral development / H. Yi, M. Kim, D. Lee, J. Park // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, № 22. – Art. 8405.

- 130 Zaitsev, A. Heat Emissions from Mining Machinery: Implications for Microclimatic Conditions in Underground Workings / A. Zaitsev, O. Parshakov, M. Semin // Mining. – 2024. – Vol. 4, No. 4. – P. 1075–1092.
- 131 Zhang, L. Turbulence models for fluid flow and heat transfer between cross-corrugated plates / L. Zhang, D. Che // Numerical Heat Transfer. Part A: Applications. – 2011. – Vol. 60, No. 5. – P. 410–440.