

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Фазылов Ильдар Робертович



ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ
ТЕРМОШАХТНОЙ ДОБЫЧЕ НЕФТИ

Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Гендлер С.Г.

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ТЕРМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЯХ ГОРНОГО МАССИВА.....	12
1.1 Состояние изученности вопроса исследования	12
1.2 Естественные термические аномалии горного массива.....	16
1.2.1 Формирование теплового режима горных выработок глубоких шахт и рудников.....	17
1.2.2 Влияние термальных вод на естественную температуру пород	21
1.3 Искусственные термические аномалии горного массива	23
1.4 Нормирование параметров микроклимата в горных выработках.....	24
1.5 Выводы по главе 1	29
ГЛАВА 2 МЕТОДЫ РАСЧЁТА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК.....	31
2.10 Эмпирические и эмпирико-аналитические методы расчёта теплового режима горных выработок	34
2.2 Численные методы расчёта теплового режима горных выработок	40
2.3 Выводы по главе 2.....	42
ГЛАВА 3 ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НЕФТЯНЫХ ШАХТ.....	44
3.1 Технология термощахтной добычи нефти	44
3.1.1 Технологические схемы разработки	45
3.1.2 Горнотехнические параметры системы разработки	47
3.1.3 Сбор и транспортировка нефтесодержащей жидкости	50
3.2 Причины и статистика прорывов пара.....	52
3.3 Анализ факторов, определяющих тепловой режим горных выработок нефтяных шахт	55
3.4 Результаты натурных исследований теплового режима горных выработок нефтяных шахт	58

3.4.1 Обзор применяемых способов регулирования теплового режима горных выработок в условиях нефтяных шахт.....	58
3.4.2 Методика проведения натуральных исследований теплового режима горных выработок.....	61
3.4.3 Результаты исследования уклонного блока	63
3.5 Анализ результатов натуральных исследований.....	67
3.6 Выводы по главе 3.....	75
ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ОСНОВЕ ВАРИАНТНЫХ РАСЧЁТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКЕ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	77
4.1 Адаптация существующей методики расчёта теплоступлений для условий нефтяных шахт	77
4.2 Учёт теплоступлений от источников теплоты, характерных для условий горных выработок нефтяных шахт.....	80
4.3 Верификация методики расчёта температуры воздуха в условиях нефтяных шахт	82
4.4 Оценка эффективности регулирования теплового режима горных выработок традиционными способами	84
4.4.1 Повышение расхода воздуха в выработках уклонного блока	85
4.4.2 Секционное проветривание уклонных блоков.....	87
4.4.3 Теплоизоляция стенок горных выработок.....	88
4.5 Обеспечение нормативных значений температуры воздуха непосредственно в рабочей зоне.....	90
4.5.1 Описание устройства	90
4.5.2 Моделирование воздухораспределения и теплораспределения при локальной подаче воздуха в рабочую зону	92
4.6 Выводы по главе 4.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	103

ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение	121
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт об использовании результатов кандидатской диссертации	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В Решение о выдачи патента на изобретение	123

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Безопасная и эффективная разработка нефтяных месторождений термошахтным методом определяется возможностью обеспечения регламентируемых правилами безопасности климатических параметров рудничного воздуха в выработках уклонного блока, которые непосредственно используются для добычи нефти. Тепловое воздействие на пласт исключить невозможно, так как это неотъемлемая часть технологического процесса по добыче нефти термошахтным способом, в связи с этим возникает необходимость регулирования теплового режима горных выработок с учётом технологических особенностей термошахтного способа разработки. Решение этой задачи невозможно без учета сложных тепло-массообменных процессов, имеющих место, как при прогреве нефтяного пласта высокотемпературным теплоносителем, так и при теплообмене между рудничным воздухом и неоднородным горным массивом, окружающим добычные выработки. Несмотря на то, что исследованию динамики тепломассопереноса в горных выработках шахт и рудников было посвящено значительное количество научных работ отечественных и зарубежных авторов, особенности этих процессов для условий нефтяных шахт при использовании термического метода добычи нефти, изучены недостаточно. На данный момент, существующие методики расчёта теплового режима не позволяют выполнить корректный прогноз теплового режима выработок уклонного блока нефтяных шахт, вследствие чего, не предоставляется возможным разработать систему технических мероприятий, направленных на нормализацию термодинамических параметров воздушной среды, адресованных на источник теплоты, присущий разным стадиям разработки блока.

Для точного прогноза теплового режима горных выработок нефтяных шахт необходимо использовать методику расчета температуры воздуха, адаптированную для условий нефтяных шахт. Необходимо учесть специфические источники тепловыделений: транспортируемая нефтесодержащая жидкость, разогретый нефтесодержащий коллектор и вмещающие породы, испарение влаги

от транспортируемой жидкости и прорывы пара через добычные скважины и трещины в нефтесодержащем коллекторе.

Дополнительным осложнением является непостоянство температурного поля в пласте и изменение теплового режима горных выработок с течением разработки уклонного блока. На данный момент нет единой методики, позволяющей учесть тепловыделения, присущие горным выработкам нефтяных шахт на разных стадиях разработки уклонных блоков. Необходимо разработать методику расчёта теплового режима горных выработок и произвести верификацию предложенной методики, путем сравнения с натурными исследованиями микроклиматических условий уклонных блоков нефтяных шахт.

Нормирование параметров микроклимата является проблемой, решение которой необходимо для обеспечения безопасных условий труда рабочих. Согласно результатам натурных исследований, более чем в 40 % блоков зафиксировано превышение нормативного значения температуры воздуха. В работе представлены способы прогнозирования теплового режима горных выработок нефтяных шахт, а также, возможности по управлению параметрами микроклимата.

Степень разработанности темы исследования

Проблемы, связанные с ухудшением микроклимата горных выработок, встречаются на горных предприятиях достаточно часто. С повышением глубины ведения горных работ, увеличивается естественная температура пород, так, на глубоких шахтах и рудниках, температура пород может достигать 30 °С. Тепловыделения от работающих горных машин, ручных инструментов оказывают влияние на микроклимат горных выработок. В угольных шахтах окисление угля также способствует нагреву шахтного воздуха. Комплекс задачи по обеспечению нормативных значений параметров микроклимата в подземных сооружениях рассматривали Черняк В.П., Малашенко Э.Н., Киреев В.А., Полубинский А.С., Зельбельборд А.Я., Ладыженский И.Л., Спиваков Ф.П. Нормированием микроклимата и исследованием факторов, оказывающих влияние на тепловой режим горных выработок занимались Щербань А.Н., Кремнев О.А., Воропаев А.Ф.,

Величко А.Е., Черняк В.П., Брайчева Н.А., Малашенко Э.Н., Галкин А.Ф., Чабан П.Д., Дядькин Ю.Д., Шувалов Ю.В., Гендлер С.Г., Левин Л.Ю., Зайцев А.В.

Исследованием формирования микроклимата в горных выработках нефтяных шахт занимались Цхадая Н.Д., Родак В.П., Нор Е.В., Рудаков М.Л., Левин Л.Ю., Николаев А.В., Клюкин М.А. Авторы подчеркивают особенность формирования микроклимата горных выработок нефтяных шахт. Нехарактерные для условий шахт и рудников источники теплоты (транспортируемая нефтесодержащая жидкость, разогретый массив) и неконтролируемые выбросы пара в горные выработки усложняют прогнозирование микроклимата в выработках уклонного блока.

Объект исследования - тепловой режим горных выработок нефтяных шахт при термошахтном способе добычи нефти.

Предмет исследования - процессы тепломассопереноса между рудничным воздухом и неоднородным горным массивом в выработках уклонных блоков нефтяных шахт.

Цель работы

Обоснование способа регулирования теплового режима уклонных блоков нефтяных шахт, позволяющего обеспечить нормативные значения температуры воздуха в рабочих зонах горных выработок при термошахтном способе добыче нефти.

Идея работы

Выбор способа управления тепловым режимом горных выработок должен осуществляться с учетом периодов разработки уклонного блока, определяющих различную структуру теплового баланса выработок уклонного блока.

Задачи исследования

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить натурные исследования термодинамических параметров горного массива и рудничного воздуха в действующих выработках уклонных блоков;

2. Установить основные факторы, определяющие тепловой режим выработок в зависимости от стадии разработки уклонного блока, и оценить их значимость;

3. Разработать математическую модель теплофизических процессов, происходящих в выработках уклонного блока с учетом технологических параметров разработки, и методику вычислений температуры воздуха;

4. Осуществить расчеты температуры воздуха для конкретных горнотехнических условий и выполнить верификацию предлагаемой методики расчета;

5. Разработать технические решения по улучшению климатических условий в выработках уклонного блока.

Научная новизна исследования

1. Выявлены закономерности процессов тепломассопереноса между источниками теплоты и влаги в выработках уклонного блока, и рудничным воздухом, определяющие изменение его термодинамических параметров в зависимости от температуры поверхности горного массива, добываемой и транспортируемой нефтесодержащей продукции, а также, периодически прорывающегося в выработки пара.

2. Предложен инновационный подход к регулированию теплового режима выработок уклонного блока, основанный на локальном снижении температуры воздуха в рабочих зонах за счёт принудительной подачи в них воздуха с температурой, обеспечивающей нормативные значения параметров воздушной среды.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Обоснованы физическая и математическая модели процессов тепломассопереноса в выработках уклонного блока с учетом неоднородности температурного поля окружающего их горного массива и влияния различных источников теплоты.

2. Разработка адресного подхода к выбору мероприятий по регулированию теплового режима выработок очистного блока, зависящих от рассматриваемой стадии его разработки.

3. Результаты диссертационной работы подтверждены решением о выдачи патента на изобретение «Устройство для принудительного проветривания рабочих мест», заявка № 2023123269/03(051237) от 19.07.2023 г (Приложение В).

4. Результаты и рекомендации диссертационного исследования приняты к использованию при проектировании мероприятий по повышению безопасности работ при эксплуатации нефтяных шахт (акт об использовании результатов от 25.05.2023 г., Приложение Б).

Методы исследований

При выполнении работы использовался комплексный метод исследования, включающий в себя: анализ и обобщение результатов ранее опубликованных экспериментальных исследований процессов формирования теплового режима горных выработок в условиях нагревающего микроклимата; натурные исследования процессов тепломассопереноса в горных выработках нефтяных шахт; статистический анализ данных по случаям паропроявлений; математическое моделирование процессов тепло-массопереноса на основе программного продукта Ansys CFX.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Тепловой режим выработок уклонного блока нефтяных шахт при термошахтном способе добычи зависит от его стадии разработки, которая определяет различную структуру теплового баланса, оказывающего влияние на термодинамические параметры рудничного воздуха.

2. Прогноз теплового режима горных выработок уклонного блока и последующая оценка эффективности мероприятий по его регулированию осуществляется по методике, разработанной с учетом данные натурных измерений, характеризующих динамику средних температур поверхностей обнажений нефтесодержащего коллектора, пород кровли и почвы, находящихся с ним в контакте, а также пара, периодически поступающего в буровую галерею.

3. Локальная нормализация теплового режима в рабочих зонах буровой галереи в период превышения нормативных значений температуры воздуха

достигается за счёт принудительной подачи в них воздуха с температурой, обеспечивающей нормативные значения параметров воздушной среды.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается использованием современного программного обеспечения для осуществления математического моделирования аэротермодинамических процессов и обработки результатов натурных исследований параметров теплового режима; удовлетворительным соотношением результатов моделирования и данных натурных измерений; непротиворечивостью результатов моделирования аналогичным данным других авторов;

Апробация результатов

Выполненные исследования были представлены в течение 4 лет обучения на 6 российских и международных конференциях, после которых были внесены незначительные корректировки в проведенное исследование, согласно комментариям и замечаниям экспертной комиссии.

1. XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов "Актуальные проблемы недропользования", 12-16 апреля 2021 г., Санкт-Петербургский горный университет;

2. IV Международная научно-практическая конференция "Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование", 27-28 октября 2021 г., Санкт-Петербургский горный университет;

3. XXX – Международный научный симпозиум НЕДЕЛЯ ГОРНЯКА – 2022, НИТУ «МИСиС»;

4. XVII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» 16-20 мая 2022 г., Санкт-Петербургский горный университет;

5. Международный научный симпозиум НЕДЕЛЯ ГОРНЯКА – 2023, НИТУ «МИСиС»;

6. Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Промышленная безопасность и охрана труда» 13-15 декабря 2023 г., Санкт-Петербургский горный университет.

Личный вклад автора заключается в определении проблемы исследования, выполнении постановки цели и задач исследования, разработке методики проведения натурных исследований и построения математической и компьютерной модели, проведения натурных и теоретических исследований, компьютерного моделирования, формулировании защищаемых научных положений и заключения.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 10 печатных работах (пункты списка литературы № 13, 14, 15, 16, 106, 107, 108, 127, 129, 130), в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (Приложение А) и 1 решение о выдаче патента на изобретение (Приложение В).

Структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, с выводами, заключения, списка литературы, включающего 132 наименования. Работа изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков, 14 таблиц и 3 приложения.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Гендлеру С.Г. за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, консультации и ценные указания, кандидату технических наук, доценту Серегину А.С. за помощь в проведении натурных исследований и компьютерного моделирования.

ГЛАВА 1 ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ТЕРМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЯХ ГОРНОГО МАССИВА

1.1 Состояние изученности вопроса исследования

В горнодобывающей промышленности, в особенности при разработке месторождений подземным способом, возникает необходимость обеспечения безопасных условий труда рабочих, промышленной, аэрологической и пожарной безопасности, а также эффективного использования энергоресурсов.

В подземных сооружениях, осуществляется нормирование параметров воздушной среды, так, предъявляются требования к рудничному воздуху в части концентрации вредных газов, запыленности, скорости и температуры. Одним из наиболее сложным, с точки зрения управления, является регулирование теплового режима горных выработок. Согласно ФНП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» температура рудничного воздуха не должна превышать $+26^{\circ}\text{C}$ [79].

Основными причинами повышения температуры рудничного воздуха в условиях подземных сооружений являются:

- гидростатическое сжатие воздуха (особенно актуально для глубоких шахт и рудников);
- теплообмен шахтного воздуха с массивом, окружающим горные выработки (при высоких температурах пород);
- тепловыделения от работающего горного оборудования;
- тепловыделения от процессов окисления пород и полезного ископаемого (особенно актуальные для угольных шахт и полиметаллических руд);
- тепловыделения от технологических операций, определяемыми особенностями добычи полезных ископаемых (закладка выработанного пространства твердеющей или гидравлической смесью, закачка пара в горный массив) [18,117].

С учетом увеличения интенсивности добычи полезных ископаемых, что связано с усовершенствованием горного оборудования, существующие схемы и

способы проветривания горных выработок и охлаждения воздуха становятся менее эффективными. Применяемых систем вентиляции и кондиционирования для существующих горнодобывающих предприятий для удовлетворения потребностей в воздухе или холодильной мощности в целях обеспечения нормативных значений параметров микроклимата в рабочих зонах при вовлечении в отработку новых запасов и углублении зон ведения горных работ становится недостаточно. Таким образом, для обеспечения безопасных условий труда при добыче полезных ископаемых на шахтах и рудниках, необходимо постоянное совершенствование систем вентиляции и кондиционирования, которые должны базироваться на инновационных решениях, учитывающих изменяющиеся условия формирования теплового режима [119].

Одним из факторов, определяющим актуальность исследования являются значительные энергетические и финансовые затраты на обеспечение в горных выработках необходимого качества воздушной среды. Увеличение глубины ведения горных работ приводит к повышению температуры горного массива и протяжённости горных выработок, что определяет необходимость увеличения количества воздуха и разработки мероприятий по его охлаждению. Сдерживающим фактором, при этом может являться ограничение максимальной скорости воздуха, что влечёт за собой повышение их сечения или сооружение дополнительных выработок.

На существующих рудниках, где осуществляется вовлечение в отработку новых залежей и увеличиваются объёмы добычи, возникает потребность в подаче большего количества воздуха, а в некоторых случаях и его охлаждение [37].

При выполнении работ в условиях повышенной температуры воздуха, нервная система и механизм терморегуляции работника перегружены. Это является причиной снижения внимательности и общего физического состояния человека. Неблагоприятные условия работы, вызванные повышенным значением температуры воздуха, помимо прямого негативного воздействия на организм человека, могут являться причиной травматизма и снижения интенсивности труда ввиду снижения внимания и выносливости рабочих в условиях повышенных

температур. Повышенные значения температуры воздуха в горных выработках являются сдерживающим фактором по времени ведения работ в зонах высоких температур (далее ЗВТ), а также проведения аварийно-спасательных работ профессиональными аварийно-спасательными формированиями (ПАСС(Ф) в ЗВТ [109].

В основе нормирования параметров микроклимата, обеспечивающих безопасные и комфортные условия труда для рабочих и способствующих эффективному труду, лежат отраслевые нормативные документы [110,78,79,88]. Научные исследования учёных в области горного дела, медицины и гигиены труда в 20 веке стали основой для формирования законодательной базы, использование которой продолжается и по сей день.

Комплекс задач по обеспечению нормативных значений параметров микроклимата в подземных сооружениях, нормированием микроклимата и исследованием факторов, оказывающих воздействие на тепловой режим горных выработок рассматривали: Щербань А.Н., Кремнев О.А. [120-122], Черняк В.П., Киреев В.А. [116], Андросенко В.Н. [4-6], Гусев В.С. [23], Казаков Б.П. [42-44], Воропаев А.Ф. [9-10], Галкин А.Ф. [11,12], Дядькин Ю.Д. [28-31], Шувалов Ю.В. [117-119], Гендлер С.Г. [17-20], Левин Л.Ю. [59,63], Зайцев А.В. [36-38,], Клюкин Ю.А. [48,49].

Однако, для расчёта систем проветривания и кондиционирования и эффективного их использования, необходимо учитывать множество факторов, оказывающих тепловое воздействие на шахтный воздух. Для решения задач по обеспечению рабочих зон свежим воздухом и исследования процессов тепломассопереноса в условиях шахт и рудников было создано отдельное направление «Горная теплофизика».

За рубежом исследования по данной тематике вели M.J. McPherson [132], A.E. Hall [131], Zh. Nong, Zh. Nianchao, H. Changliang [124], G. Di Donato [126], Collins, K.J [125] и другие.

Шахты и рудники, расположенные в зонах термических аномалий, испытывают более сложные тепловые условия, чем обычные горные объекты.

Причины возникновения термических аномалий, при которых формируется нагревающий микроклимат, можно разделить на 2 группы: естественные и искусственные.

Если в условиях глубоких рудников проблема высоких температур воздуха становится актуальна в XXI веке, то уникальные условия формирования нагревающего микроклимата искусственного происхождения, возникающие в горных выработках нефтяных шахт при термошахтной добыче нефти известны с 1970-х годов. Особенность технологического процесса, а именно, закачка высокотемпературного теплоносителя (пара) в нефтесодержащий коллектор, прогрев массива, добыча и транспортировка добываемой нефтесодержащей жидкости (далее НСЖ), прорывы пара и циклическая закачка теплоносителя – являются причиной формирования нестационарного температурного поля во вмещающих породах и нефтесодержащем коллекторе, оказывающего влияние на микроклимат горных выработок [95].

Исследованием формирования микроклимата в горных выработках нефтяных шахт занимались Российские учёные: Цхадая Н.Д. [95,114,115], Родак В.П. [82], Нор Е.В. [71], Рудаков М.Л. [85,86], Левин Л.Ю. [60-62], Николаев А.В. [69,70,92], Зайцев А.В. [41,50], Клюкин Ю.А. [46-50]. Авторы подчеркивают особенность формирования микроклимата горных выработок нефтяных шахт и сложность прогнозирования теплового режим горных выработок. Нехарактерные для условий горных выработок источники теплоты и неконтролируемые выбросы пара в горные выработки усложняют прогнозирование и управление микроклиматом в выработках уклонных блоков.

С момента внедрения термошахтного способа разработки нефти на Ярегском месторождении Коноплевым Ю.П. [52,100,101], Цхадая Н.Д. [95], проводились исследования в области повышения безопасности добычи нефти термошахтным способом.

Учитывая активное развитие численных методов расчёта, моделированием распределения температурных полей в массиве и горных выработках занимались Дуркин С.М. [26-31], Семин М.А. [58,62,91], Николаев А.В. [3], Клюкин Ю.А.

[46,58], Липаев А.А. [64]. Велись разработки технических решений, направленных на улучшение параметров микроклимата и проводились их опытно-промышленные испытания.

Актуальность проблемы повышенных температур воздуха в горных выработках нефтяных шахт возрастает на сегодняшний день. В 20 веке предоставлялась возможной безопасная добыча нефти термошахтным способом, ввиду малых производственных мощностей. Однако, за последнее десятилетие, из-за истощения прежних разрабатываемых участков и внедрения в разработку новых, расположенных на большем удалении от воздухоподающих стволов, увеличения доступности электроэнергии и появления более эффективных технологий подготовки пара, повышения объемов закачки пара и увеличения производственных мощностей шахт и рудников увеличивается тепловая нагрузка на рудничный воздух. Так, на сегодняшний день, внедренные ранее, традиционные мероприятия по нормализации параметров микроклимата в уклонных блоках нефтяных шахт становятся все менее эффективными, на некоторых добычных участках (уклонных блоках) наблюдается превышение температуры воздуха нормативных значений, учащаются случаи прорыва пара.

1.2 Естественные термические аномалии горного массива

Естественными термическими аномалиями горного массива можно считать геологические условия месторождения, обусловленными следующими факторами:

- высокая температура пород на глубине ведения горных работ (особо актуально для глубин более 1 км), определяемая геотермальным градиентом для рассматриваемого региона;
- повышенное значение температуры массива в зонах выхода геотермальных вод;
- повышения температур в выработках (камеры, рудоспуски, дучки), где аккумулируется добываемое полезное ископаемое, которое выделяет теплоту при протекании окислительных процессов (уголь, полиметаллическая руда).

Например, окислительные процессы угля в условиях угольных шахт могут являться причиной локального нагрева угля и последующего его самовозгорания. В условиях рудников Норильска, тепловыделения от окисления руды составляют порядка 20% [17].

Из перечисленных выше факторов, контролируемое влияние возможно только на процессы окисления пород и полезного ископаемого. Снижение интенсивности протекания процессов окисления горных пород и добываемого полезного ископаемого достигается путём орошения специальных антиокислительных растворов и снижения запыленности горных выработок.

Природа возникновения повышенной температуры массива на больших глубинах, наличия геотермальных вод не позволяет исключить эти факторы из условий формирования теплового режима подземных сооружений, поэтому, в таком случае, необходимо бороться с последствиями их теплового воздействия на рудничный воздух.

1.2.1 Формирование теплового режима горных выработок глубоких шахт и рудников

Установлено, что наиболее значимым фактором, определяющим температуру воздуха в глубоких шахтах и рудниках, является теплообмен между горными породами и рудничным воздухом и гидростатическое сжатие воздуха [17,37,72]. Подаваемый в рудник воздух, имеющий температуру +4 °С на устье воздухоподающего ствола, при достижении отметки -1500 м может достигать температуры +17°С. Нагрев воздуха объясняется процессом гидростатического сжатия воздуха и теплообменом со стенками ствола. Температура пород проектируемых месторождений подземных сооружений определяется следующим образом:

Значения температуры пород нейтрального слоя $T_{н.с}$, глубины его залегания $H_{н.с}$ и геотермического градиента σ устанавливаются на основании данных инженерно-геологических изысканий. Значительную роль в исследовании геотермического градиента внесли исследования, полученные на Кольской

сверхглубокой скважине. Из результатов исследования, стало ясно, что геотермический градиент изменяется по мере углубления скважины, так, определен градиент 0,01 °С/м при глубине до 3 км., 0,025 °С/м на глубине до 5 км. И 0,015 °С/м на глубине до 11 км. [25,112] В рамках горной теплофизики, ведение горных работ ограничивается относительно небольшой глубиной (до 2 км), поэтому термические процессы, происходящие на более низких слоях Земли не являются предметом изучения.

В общем виде, геотермальный градиент массива определяется по формуле 1.1:

$$\text{grad}T = i\partial T/\partial x + j\partial T/\partial y + k\partial T/\partial z, \quad (1.1)$$

где i, j, k – единичные векторы, совпадающие с положительными направлениями осей x, y, z соответственно, T – температура массива, °С [66].

В контексте определения геотермического градиента с увеличением глубины определяется температурный градиент по направлению углубления от поверхности в глубь массива.

Так, температура пород на глубине h определяется по формуле 1.2:

$$T_h = T_{h.c} + \sigma(H - H_{h.c}) \quad (1.2)$$

Однако геотермический градиент для конкретного месторождения или региона более точно определяется по результатам натуральных исследований.

В уже существующих горных выработках, определение температуры массива возможно при помощи измерения температуры пород в шпурах в зоне отсутствия теплового воздействия рудничного воздуха на горный массив.

Воздух, проходящий по пути от воздухоподающего ствола к месту его потребления, уже, на расстоянии около 2 км от устья ствола – имеет температуру, равную температуре пород. Это особенно заметно на объектах, находящихся на глубине более 1 км от поверхности земли, где температура вмещающих пород превышает 30 °С и на глубинах 1,5 км и 2 км достигает, соответственно, 35 °С и 40 °С [32].

Наиболее высокие температуры на глубине 1 км отмечены в северо-восточной части Сибири, на полуострове Камчатка и в Центральной Азии. В этих

регионах температура на глубине 1 км может достигать 100°C. В 1995 году была разработана геотермальная карта России для использования в геотермальном проектировании и разведке геотермальных ресурсов. Несмотря на то, что карта была создана в 20 веке, она по-прежнему используется при проектировании новых шахт и рудников, а также, оценки потенциала геотермальной энергии в России и странах СНГ.

Ниже представлены примеры месторождений, на которых является актуальной проблем высоких температур массива в зоне ведения работ:

- Ведение горных работ на рудниках Норильска характерно повышенным значением температуры горных пород на глубине рабочих горизонтов. Так, на шахте «Глубокая» рудника «Скалистый», являющемся самым глубоким рудником в Евразии, достигнута проектная глубина в сентябре 2018 года и составляет 2056 м, естественная температура пород на такой глубине достигает +49 °С. На руднике «Таймырский», находящимся в эксплуатации с 1982 года на данный момент ведется добыча на глубине 1532 м при температуре вмещающих пород более +35 °С [37].

- На угольных шахтах Донбасса в период активной добычи угля, при ведении работ на глубине 1200 м, температура вмещающих пород достигла +45 °С. На шахте «Комсомольская» (н. Воркута, глубина ведения работ – 1100 м.), температура пород достигает более +30 °С [120].

- На самой глубокой шахте России на 2023 год - «Черёмуховская-Глубокая» (н. Североуральск) находящейся в эксплуатации с апреля 2015 года, глубина ведения горных работ достигает 1550 м. и шахте «Ново-Кальинская» (г. Североуральск), эксплуатируемой с июля 2005 года, работы ведутся на глубине 1243 м., при температуре пород + 35 °С.

- Рудник "Приаргунское" в Бурятии - крупнейший рудник в России по добыче меди, расположенный на глубине более 1000 метров. Температура вмещающих пород достигает +40 °С.

В таблице 1.1 представлены значения температур вмещающих пород на шахтах и рудниках, расположенных на территории России и СНГ.

Таблица 1.1 — Примеры глубоких шахт и рудников, расположенных на территории России [32]

№	Название шахты/рудника	Регион	Глубина ведения работ, м	Температура пород, °С
1	Рудник Скалистый	Г. Норильск	2056	49
2	Рудник Таймырский	Г. Норильск	1532	>35
3	Шахтёрская-Глубокая	Донбасс	1546	>42
4	Гвардейская	Донбасс	1430	>42
5	Прогресс	Донбасс	1340	>42
6	Комсомольская	Г. Воркута	1100	30
7	Черёмуховская-Глубокая	Североуральск	1550	>35
8	Ново-Кальинская	Североуральск	1243	>35
9	Омолон	Магаданская обл.	>1000	40
10	Приаргунское	Респ. Бурятия	>1000	40
11	Учалинско - Тагильский	Свердловская обл.	>1000	45

Проблемы, связанные с обеспечением нормативных значений параметров микроклимата в рабочих зонах шахт и рудников актуальны для зарубежных компании, эксплуатирующие глубокие шахты и рудники. Ниже представлены примеры шахт и рудников, на которых, наиболее остро стоит проблема повышенных значений температуры горных пород в зоне ведения работ.

Шахты ЮАР:

Шахта «Mponeng» – самая глубокая шахта в мире, находится в провинции Гаутенг, глубина ведения работ более 3,4 км. Рудник по добыче золота является одним из самых крупных в ЮАР. Температура вмещающих пород достигает +50 °С. На рудниках «Driefontein» и «Kloof» ведутся работы на глубине более 3,4 км с температурой пород более +45 °С.

Рудники Южной Америки:

Рудник «El Teniente» (Чили), расположена в Андском хребте, на глубине около 2,4 км. Это крупнейший в мире подземный рудник по добыче меди, температура вмещающих пород достигает +50 °С. Рудник «Cerro Corona» (Перу), находится на севере Перу, на глубине около 2 км., ведется добыча меди и золота,

температура вмещающих пород достигает +30 °С. Шахта «Yanasocha» (Перу) глубина ведения работ более 2,5 км., крупнейший золотодобывающий рудник в Южной Америке, температура вмещающих пород достигает +35 °С.

Рудники Северной Америки:

Рудник «Kidd Mine» (Канада, провинция Онтарио) глубина ведения работ более 3 км, температура пород в руднике достигает +55 °С. Рудник «Red Lake» (г. Ред-Лейк, провинция Онтарио) глубина ведения работ 2,5 км., температура пород достигает +46 °С. Рудник «LaRonde» (Канада, провинция Квебек) работы ведутся на глубине более 3 км, температура пород в руднике достигает +35 °С. Рудник «Creighton Mine» (Канада, г. Крейтон) глубина ведения работ 2 км., температура в руднике достигает +32 °С.

Рудники США:

Рудник «Homestake» (Южная Дакота) глубина ведения работ достигает 2 м, температура пород в руднике достигает +38 °С.

Рудники Европы:

Рудник «Красный Луч» (Украина), расположенный на глубине более 1000 метров и специализируется на добыче урана, температура вмещающих пород может достигать +42 °С.

Рудник «Савукоу» в Финляндии, расположенный на глубине около 1,2 километров и специализируется на добыче золота. Температура вмещающих пород может достигать +45 °С.

Рудники Китая:

Рудник «Jinchuan Group International Resources Co. Ltd.», (провинция Ганьсу), расположенный на глубине более 2,5 км и являющийся одним из самых глубоких рудников в Китае. Температура пород на глубине ведения работ достигает +30 °С.

1.2.2 Влияние термальных вод на естественную температуру пород

Существенную роль в переносе теплоты играют подземные воды. Они могут являться переносчиком тепловой энергии из более глубоких слоёв к поверхности. И наоборот, нисходящие потоки воды в областях питания водоносных коллекторов

охлаждают горный массив. Наиболее яркие примеры влияния термальных вод на естественную температуру пород представлены ниже [112]:

- Температурная аномалия зафиксирована на месторождении «Трудовое», расположенном в Киргизии. На Сарыджазском ГОКе при строительстве штольни «Капитальная» зафиксирован рост температуры до $+61\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальный температурный градиент составляет $0,63\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$. В забое зафиксирована температура воздуха $+51\text{ }^{\circ}\text{C}$ [32].

- Шахта «Ткварчельского» им В.И. Ленина, в которой разрабатывалась площадь Ткварчельского каменноугольного месторождение, расположенная в Очамчирском (на момент 1975 г.) районе Абхазии. В процессе разработки пересечены горизонты восходящих термальных вод на отметке $+1100\text{ м}$, $+950\text{ м}$ и $+500\text{ м}$. Температура термальных вод колеблется в диапазоне $+37 - +42\text{ }^{\circ}\text{C}$, вмещающие породы в зонах температурного влияния термальных потоков равны температуре термальных вод. Температурная аномалия оказывала влияние на тепловой режим шахты всё время ее эксплуатации. Подобное явление вызвало повышенный интерес у ученых АН ГССР [72], ученый исследовал особенности формирования теплового режима и возможности предотвращения или минимизации фильтруемых по вмещающим породам и трещинам термальных вод на тепловой режим.

- Месторождение «Эрма-река» (Болгария). На глубине 250 м . температура пород уже достигает $+44\text{ }^{\circ}\text{C}$, на глубине более 400 м . температура пород возрастает и достигает $75-112\text{ }^{\circ}\text{C}$. Причиной аномальной температуры пород является приближение горных работ к зонам карстовых пустот и трещин, заполненных термальными водами с напором $20-50\text{ атм}$. Причиной аномалии является температура термальных вод более $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зоне расположения месторождения. Учёные из Высшего горногеологического института г. София занимались исследованиями теплового режима шахты.

- Рудники «Любин», «Польсковице», «Рудна», в Польше, глубина выемочных участков $500-1000\text{ м}$, температура пород $18-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, исследованиями

теплового режима рудников занимались учёные силезского политехнического института.

- Повышенные значения температуры естественных пород являются причиной удорожания себестоимости добываемого сырья, увеличения опасности добычи полезных ископаемых, в некоторых случаях, вовсе, невозможности извлечения полезного ископаемого на некоторых участках или существенного осложнения его добычи.

1.3 Искусственные термические аномалии горного массива

Искусственными термическими аномалиями считаются процессы, являющиеся частью технологического процесса, выделяющие теплоту в горные выработки. На рудниках, разрабатываемых системами разработки, предполагающими возведение твердеющей закладки - искусственной термической аномалией является процесс затвердевание бетонной смеси, который сопровождается выделением теплоты [17]. Тепловыделения от твердеющей закладки, особенно, ощутимы в условиях глубоких рудников, при температуре пород более $+26^{\circ}\text{C}$. В таком случае, теплота, образуемая при затвердевании закладки, не рассеивается в горном массиве за счёт кондуктивного теплообмена между закладочным массивом и горным массивом, а в результате теплообмена передаётся в рудничный воздух.

Большую энергетическую нагрузку, вызванную технологическим процессом, можно наблюдать в нефтяных шахт. Технология термошахтной добычи нефти подразумевает закачку теплоносителя в нефтесодержащий коллектор. Учитывая несовершенство технологического процесса, поступающая в массив теплота не полностью расходуется на прогрев нефтесодержащего коллектора, часть теплоты поступает в горные выработки и оказывает значительное тепловое влияние на рудничный воздух [7,39].

В зависимости от геологических и технологических условий, структура теплового баланса горных выработок может содержать перечисленные выше

термические аномалии при различной степени их влияния на формирование теплового режима горных выработок в совокупности с естественными термическими аномалиями.

Перечисленные естественные и искусственные термические аномалии способствуют нагреву рудничного воздуха, а в некоторых случаях, превышению нормативных значений температуры воздуха. Особенности нормирования температуры воздуха на рабочих зонах, расположенных в горных выработках представлено в разделе 1.4.

1.4 Нормирование параметров микроклимата в горных выработках

Требования к параметрам микроклимата шахт и рудников установлены в целях создания безопасных условий труда рабочих в шахтах и рудниках при выполнении трудовых операций и отражены в следующих документах.

До 2021 года, параметры микроклимата на рабочих местах регламентировались СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [90]. Однако, с 2021 года требования, изложенные в данном документе, утратили статус «обязательные к выполнению» и по сей день носят рекомендательный характер.

Основными регламентирующими документами на 2024 год являются:

1) Приказ от 8 декабря 2020 года N 505 об утверждении «Федеральных нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых" (далее «Правила безопасности») [110].

2) Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания – СанПиН 1.2.3685-21., далее «СанПиН» [89].

3) Дополнительным отраслевым документом, регламентирующим параметры микроклимата в горных выработках нефтяных шахт Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности", в разделе LX «Требования к разработке

нефтяных месторождений шахтным способом» отражены требования по выполнению правил безопасности для нефтяных шахт, далее ФНП [111].

4) Аварийно – спасательные работы регламентируются приказом №520 от 11.12.2020г. ФНП «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы» Требования к температуре воздуха отражены в приложении 6 документа [109].

Верхний предел температуры и влажности воздуха нормируется из расчёта обеспечения комфортных условий труда рабочих, обусловленных физиологической способностью организма человека к терморегуляции, тяжестью выполняемых трудовых операций, теплоизоляционными и теплоотводящими свойствами средств индивидуальной защиты работника. В некоторых случаях, когда эксплуатирующая рудник или шахту организация при осуществлении обоснования уполномоченными организациями, получает право на отступление от правил безопасности. Как правило, отступления обосновываются внедрением компенсирующих мероприятий.

Максимальные значения температуры воздуха регламентируются п. 152 правил безопасности и составляет $+26^{\circ}\text{C}$ на рабочих местах с постоянным присутствием людей. В случае, превышения температуры воздуха нормативного значения, должно быть предусмотрено его охлаждение [110].

Согласно требованиям правил безопасности, минимальное значение воздуха, поступающего в подземные горные выработки, составляет $+2^{\circ}\text{C}$, данное требование объясняется исключением возможности обледенения стенок горных выработок. Обледенение стенок выработок способствует разрушению элементов крепи, стенок выработок и уменьшению сечения выработки, что значительно увеличивает аэродинамическое сопротивление горной выработки. Отклонение от проектных горнотехнических параметров горных выработок (сечение, шероховатость поверхности) значительно влияет на систему вентиляции шахты или рудника и приводит к невозможности подачи требуемого количества воздуха в рабочие зоны и перегрузке ГВУ.

В условиях вечной мерзлоты при подаче воздуха положительной температуры, возможно растепление стенок горных выработок и изменения теплового режима массива, окружающего горную выработку. При таянии льда в приконтурной зоне выработки, происходит растепление трещин и увеличение водопритока в горные выработки. В зонах вечной мерзлоты допускается подача воздуха меньших значений ($<0^{\circ}\text{C}$), в соответствии с проектом разработки месторождения в зонах многолетней мерзлоты (п.151, п. 282 правил безопасности) [110].

Для защиты работников от перегревания необходимо проводить оценку сочетанного влияния на организм всех параметров микроклимата через интегральный показатель тепловой нагрузки среды (ТНС), определяемый из уравнения 1.3 [53,98]:

$$\text{ТНС} = 0,7 \cdot t_{\text{вл}} + 0,3 \cdot t_{\text{ш}}, \quad (1.3)$$

где $t_{\text{вл}}$ – температура смоченного термометра аспирационного психрометра, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ш}}$ – температура внутри зачерненного шара, $^{\circ}\text{C}$.

Для недопущения случаев перегрева работников, значения ТНС-индекса не должны превышать значений, представленных в таблице 1.2 [53].

Таблица 1.2 – Пределы величин ТНС-индекса, рекомендуемые для профилактики перегревания организмов работников [53]

Категории работ по уровню энергозатрат	Величины интегрального показателя, $^{\circ}\text{C}$
Ia (до 139)	22,2-26,4
Iб (140-174)	21,5-25,8
IIa (1175-232)	20,5-25,1
IIб (233-290)	19,5-23,9
III (более 290)	18,0-21,8

Рекомендации к температуре воздуха с точки зрения создания благоприятных условий для функционирования организма человека изложены в разделе «Время работы при температуре воздуха на рабочем месте выше или ниже допустимых величин» СанПиН 2.2.4.548-96 и представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 — Время пребывания на рабочих местах при температуре воздуха выше допустимых величин [90]

Температура воздуха на рабочем месте, °С	Время пребывания, не более, при категориях работ ч.		
	Категория Ia-IIб	Категория IIa-IIб	Категория III
32,5	1	—	—
32	2	—	—
31,5	2,5	1	—
31	3	2	—
30,5	4	2,5	1
30	5	3	2
29,5	5,5	4	2,5
29	6	5	3
28,5	7	5,5	4
28	8	6	5
27,5	—	7	5,5
27	—	8	6
26,5	—	—	7
26	—	—	8

Учитывая таблицу 1.3., обеспечение рекомендаций СанПиН возможно двумя способами:

- организация режима труда и отдыха персонала, задействованного в зоне высоких температур;
- применение способов управления тепловым режимом горных выработок с целью снижения температуры воздуха до 26 °С.

Согласно п. 1746 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности" температура воздуха в добычных, подготовительных и других действующих выработках в рабочих зонах температура воздуха не должна превышать +26°С при влажности менее 90 % и +25 °С при влажности более 90%. Однако, учитывая осложненные условия, с точки зрения нагревающего микроклимата п. 1747 допускает ведения работ в особых выработках (в которых проводится закачка

теплоносителя, отбор продукции, находятся трубопроводы с температурой +40 °С и выше), при условии соблюдения режима труда и отдыха [111].

Для сравнения, требования к минимальной и максимальной температуре воздуха на рабочих местах, регламентируемые перечисленными выше документами отражены на рисунке 1.1.

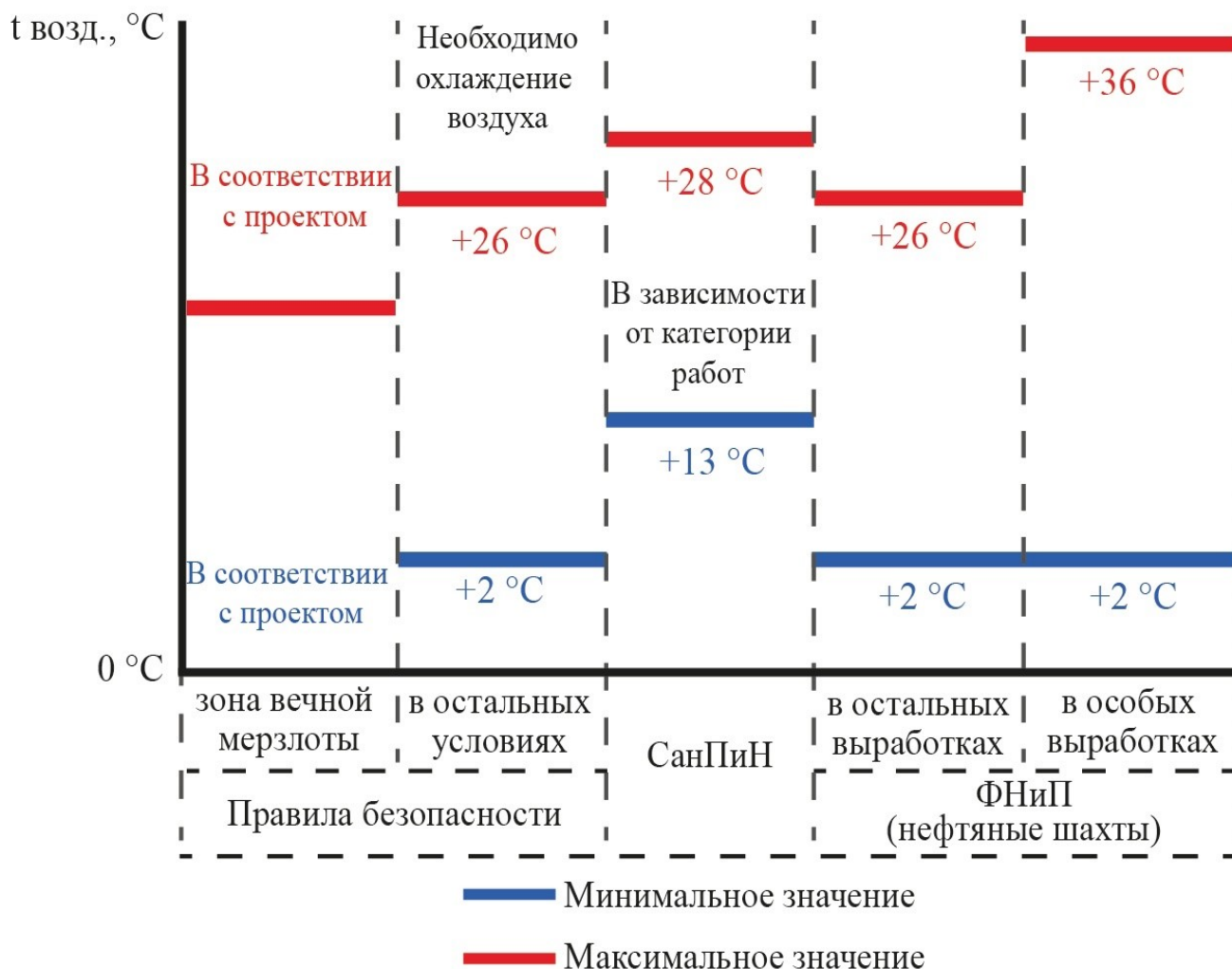


Рисунок 1.1 — Сравнение пороговых значений температуры воздуха в нормативных документах

Ограничения ведения аварийно-спасательных работ ПАСС(Ф) в зоне высоких температур представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 — Ограничения ведения аварийно-спасательных работ ПАСС(Ф) в зоне высоких температур представлены [109]

Температура воздуха, °С	Максимальная продолжительность (время) непрерывного пребывания работников ПАСС(Ф) в ЗВТ с непригодной для дыхания рудничной атмосферой, минут	
	При работе или пребывании на одном месте	При передвижении по горным выработкам
27	210	158
28	180	135
29	150	113
30	120	90
31	90	68
32	60	45
33	50	38
34	40	30
35	34	26
36	30	23
37	26	20
38	22	17
39	20	15
40	18	14

Представленные в таблице 1.4 требования значительно ограничивают возможности ведения аварийно-спасательных работ в зоне высоких температур, что требует дополнительных корректировок в схему вентиляции шахты или рудника, установки камер аварийного воздухообеспечения.

1.5 Выводы по главе 1

1) В связи с увеличением производительности горного оборудования, объёмов добычи и повышения глубины ведения горных работ, на рудничный воздух оказывается значительное тепловое воздействие. Эффективность существующих способов регулирования теплового режима горных выработок снижается, для обеспечения нормативных значений параметров микроклимата требуются значительные энергетические и экономические затраты, что определяет необходимость разработки инновационных, энергосберегающих способов регулирования:

2) Причинами формирования нагревающего микроклимата являются как естественные геотермические условия района ведения горных работ на глубине более 1500 м, наличие термических аномалий, так и технологические особенности добычи полезного ископаемого: использование твердеющей или гидравлической закладки, формирование в выработанном пространстве ледопородного массива, прогрев содержащего полезное ископаемое горного массива горячей водой или паром

3) Нормирования климатических параметров воздушной среды в горных выработках основано на обеспечении сочетанных значений температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, приводящих к равенству количества теплоты, выделяющейся от рабочих в процессе осуществления производственных операций, и количества теплоты, отводимой в окружающую среду. Однако, при невозможности или высоких затратах на нормализацию климатических параметров воздушной среды следует вести речь о внедрении компенсирующих мероприятий, снижающих негативное воздействие нагревающего микроклимата на работников.

4) Для эффективного управления климатическими параметрами воздуха в условиях термических аномалий, необходима разработка методов прогнозирования теплового режима горных выработок, позволяющих, в полной мере, учесть все определяющие его факторы.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ РАСЧЁТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Основной задачей теплового расчёта шахт и рудников является определение термодинамических параметров шахтного воздуха при учёте всех влияющих факторов, рассмотренных в главе 1.

Особенностью процессов тепломассообмена в горных выработках является тепловое взаимодействие движущегося по выработкам воздуха с практически «неограниченным» горным массивом, теплофизические свойства которого занимают промежуточное место между теплофизическими свойствами металлов и теплоизоляционных материалов в результате чего горные породы обладают уникальной теплоаккумулирующей способностью, отличающей их от ограждений наземных сооружений, что требует применения к расчёту термодинамических параметров воздуха специальных методов.

Степень нестационарности процессов тепломассопереноса существенно различна для воздушной среды и пород, окружающих выработки подземных сооружений, и, в целом, определяются временем их взаимодействия. Такая разница в степени нестационарности связана с отличием между объёмными теплоёмкостями воздуха и пород, достигающим почти три порядка.

При подаче наружного воздуха в горную выработку с начальной температурой пород и находящегося там воздуха, отличной от температуры подаваемого воздуха, в каждом ее сечении, отстоящем на расстояние l_n от-устья, по мере подхода подаваемого воздуха к этому сечению начинает развиваться процесс теплового взаимодействия.

В начальный период времени, когда процессы теплообмена носят существенно нестационарный характер, темп снижения температуры достаточно велик. Однако длительность этого периода незначительна и уже при достижении безразмерной температуры воздуха ϑ , определяемой по формуле 2.1 некоторого значения ($\vartheta_0 = 0,4-0,2$) темп изменения безразмерной температуры стабилизируется.

$$\vartheta = [t(y, \tau) - t_0] / (T_0 - t_0). \quad (2.1)$$

Это свидетельствует о том, что в диапазоне значений ϑ ($0 \div \vartheta_0$) ее динамика может характеризоваться закономерностями квазистационарного режима (рисунок 2.1).

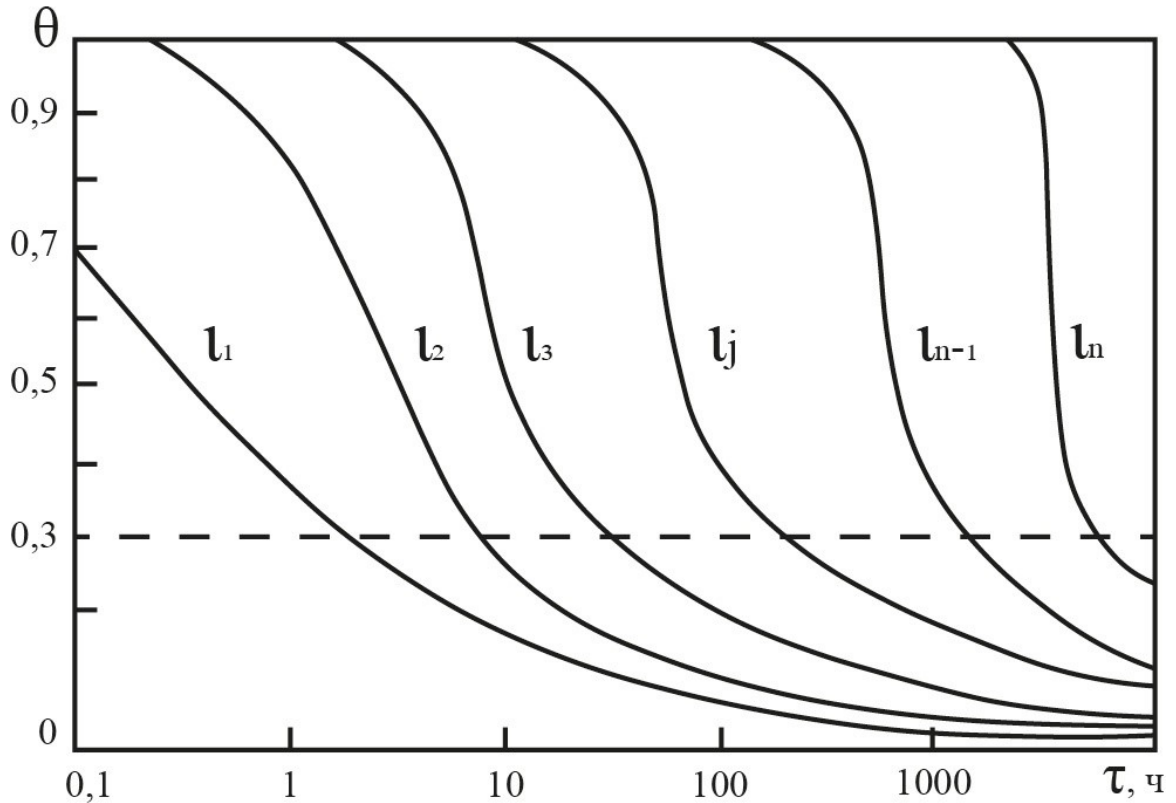


Рисунок 2.1 — Характер изменения безразмерной температуры по длине выработок [20]

Темп изменения температурного поля в породах отстаёт от темпа изменения температуры и в то время, когда теплообмен в воздушной среде уже подчиняется закономерностям квазистационарного режима, его динамика в горном массиве ещё в значительной степени нестационарная. И только через достаточно продолжительное время, составляющее в зависимости от различных условий от месяца до года, динамика процессов теплообмена в породном массиве достигает квазистационарной стадии. Таким образом, процессы теплообмена в системе воздушная среда - горный массив проходят в своём развитии три основных стадии: существенно нестационарную для всей системы в целом; квазистационарную для воздушной среды и нестационарную для горного массива, квазистационарную для всей системы в целом.

Сложная динамика процессов теплопереноса в системе рудничный воздух - горный массив привела к появлению многочисленных подходов, в которых делались попытки получить достаточно простые инженерные формулы для расчёта теплового потока, поступающего в горные выработки. Как правило, зависимость для вычисления теплового потока учитывалась далее совместно с остальными источниками теплоты при составлении уравнения сохранения энергии (теплового баланса). Именно, форма учёта теплообмена воздуха с горным массивом обусловила появление различных методов теплового расчёта выработок подземных сооружений. Обобщая эти методы следует выделить эмпирические методы, эмпирико-аналитические методы и численные методы. Первые базируются на статистической обработке данных натурных исследований параметров теплового режима с получением эмпирических зависимостей, справедливых лишь для объекта (или аналогичных объектов), где непосредственно осуществлялись инструментальные измерения.

Вторые основаны на решении уравнения теплового баланса, в котором основные источники теплоты, в том числе тепловыделения от горного массива, определяются или по аналитическим зависимостям, или по эмпирическим формулам, полученным в результате многочисленных натурных исследований. В частности, влияние на температуру воздуха массообменных процессов было предложено учитывать путём задания закона изменения или относительной влажности, или влагосодержания, или энтальпии по длине выработки [34,116,118,121,122]. Различные виды закона изменения этих параметров, в конечном итоге, и привели к отличающимся друг от друга по форме записи конечным формулам относительно температуры воздуха. Между тем, выполненный анализ показал, что при одинаковых исходных данных вычисления температуры воздуха по длине выработки дают разницу между конечными значениями температур, не превышающую $1^{\circ}\text{C} - 1,5^{\circ}\text{C}$.

Активное использование численных методов связано с развитием вычислительных технологий, появлением эффективных программных продуктов, в основном зарубежных, и возможностью верифицировать более простые методы

тепловых расчётов. Следует отметить, что, несмотря на универсальность, численные методы не позволяют в полной мере учесть всю совокупность факторов, определяющих изменения термодинамических показателей воздуха в широком диапазоне климатических, горно-геологических и технологических параметров.

2.1 Эмпирические и эмпирико-аналитические методы расчёта теплового режима горных выработок

Эмпирические методы решения задачи основаны на статистической обработке результатов натуральных исследований и наблюдений. Полученные в результате обработки натуральных исследований закономерности выражаются относительно простыми математическими зависимостями и применимы только для условий, в которых были выполнены натурные исследования. Это ограничивает область их применения только этими условиями.

Значительный вклад в развитие эмпирико-аналитических методов внесли А.Н. Щербань [120,121] и А.Ф. Воропаев [9.10], Ю.Д. Дядькин [33,34], В.Я. Журавленко [122], В.П. Черняк [116], В.А. Кузин [118], Ш.И. Ониани. [72]. Основное отличие в методах, предложенными этими авторами, при одинаковом учёте тепловыделений от горных пород заключается в задании различных законов изменения относительной влажности, влагосодержания или энтальпии по длине выработки, а также вычисления величины тепловыделений от таких «абсолютных» (энергетических источников, адиабатического сжатия воздуха, окисления, твердеющей закладки) и относительных (транспортируемое ископаемое, трубопроводы, лотки с шахтной водой) источниках теплоты.

Безусловным вкладом в упрощении методов тепловых расчётов является введённое А.Н. Щербанём и О.А. Кремневым [121,122] понятие о коэффициенте нестационарного теплообмена. Несмотря на то, что зависимости для вычисления (K_T) получены при допущениях об однородности и изотропности горного массива, постоянство температуры пород и температуры воздуха, отсутствие массообменных процессов, они характеризуют динамику теплового потока, поступающего из пород. Более того, оказалось, что коэффициент нестационарного

теплообмена имеет вполне однозначный физический смысл, характеризующий величину зоны влияния температуры воздуха на температуру пород.

Зависимость для вычисления K_t имеет вид:

$$K_t = \alpha (T_{ст} - T_v) / (T_0 - t_v) \quad (2.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м² °С;

$T_{ст}$ – температура стенок выработок, °С;

T_v – температура воздуха, °С;

T_0 – естественная температура массива, °С.

В формуле (2.1) коэффициент теплоотдачи (α) описывает интенсивность теплообменных процессов между воздухом и поверхностью горного массива и определяется зависимостью 2.2.

$$Q = \alpha (T_{ст} - T_v) \quad (2.2)$$

Определение коэффициента теплоотдачи возможно в зависимости от скорости воздуха в выработке и ее характерного диаметра по формуле 2.3 [121].

$$\alpha = 3,4 \frac{|v|^{0,8}}{D^{0,2}} \quad (2.3)$$

где v – скорость движения воздуха (м/с),

D – характерный диаметр горной выработки (м).

Отличные от формул, предложенных Кремневым О.Н., зависимости относительно теплового потока были получены А.Ф. Воропаевым, Ю.Д. Дядькиным, Ю.В. Шуваловым [10,33], С.Г. Гендлером [20], Ю.В. Зайцевым. [37]. В этих работах были предложены схожие с коэффициентом нестационарного теплообмена k_t коэффициенты.

Более сложной задачей является учёт теплообмена между воздухом и массивом, при фазовом переходе жидкости в зоне растепления или промерзания в приконтурной зоне рассматриваемой горной выработки. Процессы теплообмена в таких условиях подробно исследовались в работах Ю.Д. Дядькина [31], Ю.В. Шувалова [117-119], С.Г. Гендлера [19], А.Ф. Галкина [119] и др. Для учёта тепловыделений при фазовых переходах влаги введено понятие коэффициента агрегатных переходов K_{agr} , учитывающего повышение интенсивности теплообмена

при изменении агрегатного состояния влаги, содержащейся в горных породах. Величина $K_{арр}$ определяется соотношением 2.4:

$$K_{арр} = K_{\tau\phi} / K_{\tau} \quad (2.4)$$

где: $K_{\tau\phi}$, K_{τ} - коэффициенты нестационарного теплообмена при наличии в горных породах фазовых переходов влаги и при их отсутствии.

Агрегатные переходы вода-пар-вода оказывают влияние на процесс теплообмена между массивом и воздухом.

В том случае, когда влага испаряется только с поверхности горного массива, происходит лишь изменение коэффициента теплоотдачи. Физически это явление связано с появлением «отрицательного» источника теплоты на поверхности горного массива, интенсивность которого зависит от количества испаряющейся влаги, а математически описывается добавлением в граничное условие третьего рода слагаемого, содержащего коэффициент массоотдачи β_{τ} и разность между парциальным давлением насыщенного пара при температуре стенки горного массива $P_{н}(T_{ст})$ и парциальным давлением пара в вентиляционной струе $P_{н}(t_{в})$ определяется уравнением 2.5 [20]:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial N} = \alpha [T_0 - t_{в}] + \beta_{\tau} r [P_{н}(T_{ст}) - P_{н}(t_{в})] \quad (2.5)$$

Использование при оценке теплообмена (массообмена) коэффициентов K_{τ} и β_{τ} , которые должны аккумулировать в себе все особенности этих процессов (сложную геометрическую форму выработок, наличие тепло- и теплоизоляционных покрытий, действие в породах источников теплоты и массы различной физической природы, тепловое взаимодействие нескольких выработок, агрегатные переходы влаги и т.п.), обычно приводит к уравнению сохранения энергии для воздуха, движущегося по выработке в виде зависимости 2.6:

$$G \frac{di}{dy} = K_{арр} K_{\tau} U (T_0 - t_{в}) + \beta_{\tau} U (\theta_0 - \theta_{в}) + \sum q_i + \sum m_i, \quad (2.6)$$

где: $\sum q_i$ и $\sum m_i$ - количество теплоты и влаги, выделяющееся на единице длины выработки от машин и механизмов, движущейся воды и т.п.; θ_0 и $\theta_{в}$ - потенциалы массопереноса ненарушенных горных пород и воздуха.

Это уравнение может быть представлено и в интегральной форме (формула 2.7) [20]:

$$G(i_2 - i_1) = K_{\text{агр}} K_{\tau} F(T_o - \bar{t}_v) + \beta_{\tau} F(\theta_o - \bar{\theta}_v) + \sum Q_i + \sum M_i, \quad (2.7)$$

где: $\sum Q_i$ и $\sum M_i$ - общее количество теплоты и влаги, выделяющееся в выработке длиной L ; \bar{t}_v и $\bar{\theta}_v$ - среднее по длине значение температуры и потенциала массопереноса воздуха. Индекс «1» относится к началу выработки, а «2» - к ее концу.

Тепловыделения от энергетических источников, включающих электрооборудование $Q_{\text{об.эл}}$, машины с двигателями внутреннего сгорания $Q_{\text{двс}}$ рассчитываются следующим образом: суммарная мощность тепловыделений. для машин с электрическими двигателями рассчитывается по формуле 2.8 и формуле 2.9 соответственно:

$$Q_{\text{об.эл.}} = W_{\text{эл}} \cdot (1 - \eta), \quad (2.8)$$

где $W_{\text{эл}}$ - установленная мощность электродвигателей на оборудовании, кВт; η - коэффициент полезного действия оборудования (КПД), согласно паспортным характеристикам.

$$Q_{\text{двс.}} = 0,74 \cdot N_{\text{двс}} \cdot (1 - \eta) / \eta, \quad (2.9)$$

где $N_{\text{двс}}$ - установленная мощность двигателя машины, л.с.;

η - коэффициент полезного действия двигателя внутреннего сгорания, при отсутствии паспортных значений, принимается равным 0,4.

Иным способом учёта тепловыделений от машин с двигателями ДВС является учёт энергии сгорания топлива:

$$Q_{\text{двс}} = (P_p \cdot C_T \cdot K_{\text{двс}} \cdot 1000) / 3600, \quad (2.10)$$

где P_p — средний расход топлива, кг/час; C_T — удельная теплота сгорания топлива, МВт/кг. $K_{\text{двс}}$ — безразмерный коэффициент интенсивности тепловыделения, равный отношению теплоты, выделяющейся в рудничную атмосферу, к общему количеству теплоты, выделяющемуся при сгорании топлива [37].

При возможности проведения натуральных исследований, тепловыделение от машины с ДВС можно определить по формуле 2.11:

$$Q_{\text{двс}} = Q \cdot C \cdot \rho \cdot (T_2 - T_1), \quad (2.11)$$

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

C – теплоёмкость воздуха, $\text{кДж}/\text{кг}$;

ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;

T_1 и T_2 – температура воздуха до и после машины по пути движения воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Сульфидные руды, уголь, деревянные элементы крепи по своим свойствам окисляются при невысоких температурах. Скорость процесса окисления зависит от размера кусков или частиц, влажности и температуры. Тепловыделения при окислении пород определяются по формуле 2.12 [10,123]:

$$Q_{\text{ок}} = q \cdot (v)^{0,8} \cdot P \cdot L \cdot K, \quad (2.12)$$

где q_o – тепловыделение при окислении, приведенное к скорости движения воздуха в выработке при скорости движения воздуха;

1 $\text{м}/\text{с}$, составляет порядка 3-5 $\text{ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м})$;

v – скорость движения воздуха в выработке, $\text{м}/\text{с}$;

P – периметр выработки, м ;

L – длина выработки, м ;

K – коэффициент перевода калорий в джоули, $K = \text{кал}/\text{Дж}$

1 $\text{кал} = 4,19 \text{ Дж}$.

При движении в поле сил тяжести при сжатии воздуха происходит повышение его температуры, это объясняется уменьшением расстояния между молекулами и увеличением скорости их движения. Величину приращения температуры воздуха при гидростатическом сжатии воздуха можно определить из первого закона термодинамики при движении в поле сил тяжести. Изменение температуры воздуха за счёт гидростатического сжатия выражается зависимостью 2.13 [37]:

$$\Delta T = (g \cdot \Delta z) / (C + R/M), \quad (2.13)$$

где g - ускорение свободного падения, м/с^2 ; Δz -изменение высотной отметки, м; C - теплоёмкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$; R - универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/\text{моль}/\text{К}$; M - молярная масса воздуха, $\text{кг}/\text{моль}$.

Для определения температуры смеси, после смешивания потоков воздуха и пара возможно определить по формуле 2.14 Смешивание потоков пара с разными температурами $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{п}}$ и рудничного воздуха определяется по формуле [2.14]:

$$T_{\text{см}} = \frac{G_{\text{в}} \cdot T_{\text{в}} + G_{\text{п}} \cdot T_{\text{п}}}{G_{\text{в}} + G_{\text{п}}}, \quad (2.14)$$

где $G_{\text{в}}$ и $G_{\text{п}}$ — массовый расход воздуха и пара соответственно, $\text{кг}/\text{с}$.

Другим подходом учёта прорывающегося пара является учёт его теплосодержания (2.15):

$$Q_{\text{пара}} = C_{\text{пара}} \cdot \rho_{\text{пара}} \cdot G_{\text{пара}} \quad (2.15)$$

где $\rho_{\text{пара}}$ — плотность пара; $C_{\text{пара}}$ - теплоёмкость пара, $\text{кДж}/\text{кг}$; $Q_{\text{пара}}$ - объём поступающего пара, $\text{м}^3/\text{с}$

При отсутствии данных об общем объёме поступающего пара в выработку, возможен приближенный расчёт теплоступлений от пара ($Q_{\text{п}}$, Вт), учитывая удельный массовый расход пара и горнотехнические параметры выработки:

$$Q_{\text{п}} = C_{\text{п}} \cdot q_{\text{п}} \cdot U_{\text{выр}} (T_{\text{п}} - t_{\text{в}}) L_{\text{гал}} \quad (2.16)$$

где $C_{\text{п}}$ – теплоемкость пара, $\text{Дж}/\text{кг}^{\circ}\text{C}$;

$q_{\text{п}}$ – удельный массовый расход пара, $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$;

$U_{\text{выр}}$ – периметр выработки за вычетом ширины, м;

$T_{\text{п}}$ – температура пара, $^{\circ}\text{C}$;

$L_{\text{гал}}$ – протяженность эксплуатационной галереи, м.

Если на участке выработки или в призабойной зоне ведутся закладочные или другие работы с применением бетона, то при его затвердевании тепловыделение можно найти по формуле 2.17:

$$Q_{\text{б}} = P \cdot l_{\text{б}} \cdot K \cdot q_{\text{б}}, \quad (2.17)$$

где $q_{\text{б}}$ – удельное выделение при отвердевании бетона, $q_{\text{б}} = 50-100 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч})$;

P – периметр выработки в свету, м;

$l_{\text{б}}$ – протяженность участка закладки (бетонирования).

Тепловыделение при работе людей определяется по формуле 2.18:

$$Q_{\text{л}} = q \cdot n, \quad (2.18)$$

где q – среднее количество теплоты, выделяемое работающим человеком (зависит от вида работ);

n – число одновременно работающих людей в выработке/

Из решения уравнения (2.6) или (2.7) с учетом формул (2.8) – (2.18) обычно определяется температура воздуха.

Использование метода коэффициента нестационарного теплообмена фактически эквивалентно допущению о квазистационарном характере процесса теплового взаимодействия флюида с горным массивом. Поэтому многими специалистами ставится вопрос о правомерности такого подхода. Последнее может быть определено только при сопоставлении результатов, получаемых на основе использования K_{τ} и более сложных методов, свободных от выше сформулированного допущения. Эти методы получили название сопряженных. Они, как правило, базируются на решении уравнения энергии для воздушного потока, имеющего следующий вид (2.19):

$$G \frac{D_i}{\partial \tau} = q_q + q_m + Q\delta(y - y_0) + M\delta(y - y_1), \quad (2.19)$$

где q_q и q_m - потоки теплоты и влаги из горного массива; Q и M - точечные источники теплоты и влаги, расположенные в сечениях выработки, находящихся на расстояниях y_0 и y_1 от ее начала, $\delta(y - y_0)$, $\delta(y - y_1)$ - дельта-функция Дирака [20].

2.2 Численные методы расчёта теплового режима горных выработок

Принцип численных методов расчета заключается в аппроксимации сложных математических или физических задач с использованием дискретизации, что позволяет преобразовать их в более простые численные задачи. Численные методы позволяют проводить расчеты в случаях, когда аналитическое решение не доступно или слишком сложно.

Использование численных методов для прогнозирования теплового режима горных выработок и микроклиматических параметров в атмосфере горных

выработок означает применение математических моделей и компьютерных расчетов для оценки тепловых и климатических условий в подземных горных рабочих выработках.

Для решения сопряжённых задач, связанных с формированием термодинамических параметров в воздушной среде горных выработок обычно используются численные методы. При этом, в наиболее простом виде для средне интегральных по сечению выработки энтальпии i воздуха и его влагосодержания x уравнение энергии и баланса массы имеют следующий вид (зависимости 2.20 и 2.21 соответственно):

$$\rho_b \frac{\partial i}{\partial \tau} + \rho_b v \frac{\partial i}{\partial y} = q_{vп} + q_{vи}; \quad (2.20)$$

$$\rho_b \frac{\partial x}{\partial \tau} + \rho_b v \frac{\partial x}{\partial y} = j_{vп} + j_{vи}; \quad (2.21)$$

где: $q_{vп}$, $q_{vи}$ и $j_{vп}$, $j_{vи}$ - соответственно тепло- и влаговыделения, поступающие в воздушную среду из горных пород и от других источников, расположенных в выработках, Вт/м³, кг/м³·с.

Если тепло- и влагопоступления от «абсолютных» источников (оборудование, люди, технологические процессы) рассчитываются без особых сложностей [34,35], то для нахождения величин $q_{vп}$ и $j_{vп}$ необходимо решение дополнительных дифференциальных уравнений, определяющих процессы тепло- и массопереноса в породах, окружающих подземные сооружения.

Для решения системы уравнений, аналогичных (2.20) - (2.21), А.В. Зайцевым использован аналог метода конечных элементов, который широко используется в инженерных и физических расчётах, начиная с 1960-х годов прошлого века. Результаты исследований Зайцева А.В. реализованы в программном комплексе АК «Аэросеть» [37].

Из программ, разработанных специалистами дальнего зарубежья, можно отметить следующие программные пакеты: австралийская Ventsim, американская

VnetPC, южноафриканская VUMA, японская Mivena, немецкая GRUBE-V [207]. В 2024 году – наиболее популярной является Ventsim.

Следует отметить, что зарубежные программные продукты, по существу, ориентированы на решение вентиляционных задач. Тепловые расчёты, как правило, носят подчинённый характер и направлены на оценку влияния температур воздуха на величину естественной тяги и возможность образования циркуляционных контуров в вентиляционной сети.

Один из немногих примеров решения в России сопряжённой задачи применительно к выработкам, пройденных в вечномёрзлых породах, представлен в работах Ю.А. Хохолова [96,113]. Разработанное им программное обеспечение даёт возможность производить одновременные вычисления распределения воздуха по выработкам вентиляционной сети и распределение температур в воздухе и горном массиве по длине каждой из выработок.

2.3 Выводы по главе 2

1. Особенностью процесса тепломассообмена в условия подземных сооружений является взаимный теплообмен рудничного воздуха и практически неограниченного горного массива, теплофизические свойства которых занимают промежуточное место между свойствами металлов и теплоизоляционных материалов. Данное условия отличает подземные сооружения от наземных и является причиной применения специальных методов для расчета термодинамических параметров воздуха.

2. Степень нестационарности процессов тепломассопереноса существенно различна для воздушной среды и пород, окружающих выработки подземных сооружений, и, в целом, определяются временем их взаимодействия, что связано с отличием между объёмными теплоёмкостями воздуха и пород, достигающим почти три порядка. Процессы теплообмена в системе воздушная среда - горный массив проходят в своём развитии три основных стадии: существенно нестационарную для всей системы в целом; квазистационарную для воздушной среды и нестационарную для горного массива; квазистационарную для всей

системы в целом. Для инженерных расчётов процессов теплообмена горного массива с воздухом целесообразно использовать зависимости, описывающие процессы теплообмена, в каждой из выявленных стадий.

3. Для вычисления изменения термодинамических параметров рудничного воздуха в горных выработках со сложными закономерностями формирования теплового режима для прогнозных расчётов целесообразно использовать эмпирико-аналитические методы, в рамках которых известные источники выделения теплоты и влаги описываются аналитическими выражениями, а учёт тепловыделений и влаговыделений от ранее не исследованных источников осуществляется на основе эмпирических зависимостей, полученных на основе данных натурных измерений.

ГЛАВА 3 ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НЕФТЯНЫХ ШАХТ

3.1 Технология термошахтной добычи нефти

В 1937-1949 для увеличения КИН на Ярегском месторождении был внедрен шахтный способ добычи нефти, в эксплуатацию введены 3 нефтяные шахты. При таком способе добычи, вскрытие нефтесодержащего коллектора осуществлялось скважинами, пробуренными из горных выработок, пройденных на горизонте, расположенном на 10-20 м. выше нефтяного пласта или в нефтяном пласте [2,7,87].

В 1968 году было принято решение провести испытания системы теплового воздействия на нефтяной пласт в условиях шахтной разработки нефти. С 1972 года система внедрена в производственных масштабах впервые в мире и получила название «термошахтный способ добычи нефти». Разработчиками термошахтного способа добычи нефти считается группа специалистов из ВНИИнефти, ПечорНИПИнефти и НШУ «Яреганефть»: В.С. Зубков, П.Г. Воронин, Е.И. Гуров, В.П. Табаков, В.С. Сукрушев, Г.Г. Миллер, В.Г. Вертий, Б.А. Тюнькин, Гуров Е.И. и другие [21]. Суть способа заключается в прогреве нефтесодержащего коллектора, посредством нагнетания в него теплоносителя. При увеличении температуры, вязкость нефти значительно снижается до значений 30 мПас (при температуре 100 °С) и нефть под действием гравитационных сил по добычным скважинам поступает в горные выработки добычных участков – буровых или эксплуатационных галерей [51,52].

С 1972 года по 2023 г. на Ярегском месторождении испытывались различные системы термошахтной разработки нефти. Байбаков Н.К., Гарушев А.Р., Мишаков В.Н., Коноплев Ю.П. [3,51,52,97], Тюнькин Б.А., Груцкий Л.Г. [74-76,97] занимались разработкой новых систем разработки, основной задачей которых было обеспечение максимального КИН при минимальных энергетических и экономических затратах, а также, обеспечение безопасных условий труда рабочих в нефтешахтах. В «лучшие» годы термошахтной добычи нефти удалось достичь КИН 0,7, а к 2023 году, средний КИН на Ярегском месторождении достиг 0,5 [51].

В 2023 г. на Ярегском месторождении ведется добыча по одногоризонтной и подземно-поверхностной системе. На месторождении функционирует 3 шахты, а общее количество добычных блоков – уклонных блоков составляет 15 штук. Некоторые блоки находятся на завершающей стадии эксплуатации, а на некоторых только начинается процесс прогрева прилегающего к блоку нефтесодержащего коллектора [24].

3.1.1 Технологические схемы разработки

На Ярегском месторождении проводились опытно-промышленные испытания различных систем разработки залежей сверхтяжелой нефти термошахтным способом, концептуально, применяемые в разные периоды времени системы разработки отличаются способом доставки теплоносителя в нефтесодержащий коллектор [45,52]. Принципиальные схемы систем разработки при термошахтной добыче нефти представлены на рисунке 3.1.

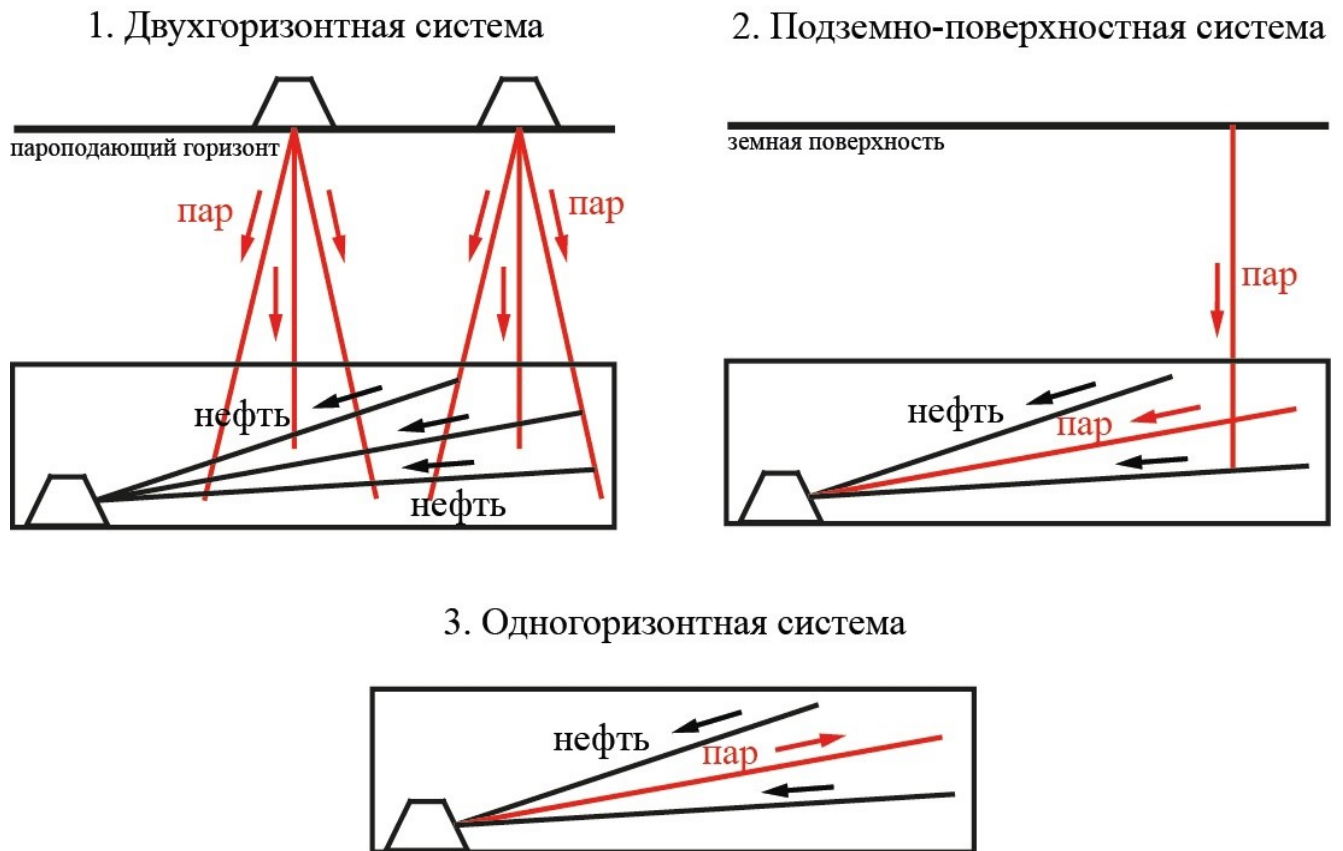


Рисунок 3.1 — Принципиальные схемы систем разработки при термошахтной добыче нефти

При двухгоризонтной системе разработки вскрытие нефтяного пласта осуществляется из горных выработок, пройденных по туффитовому горизонту, над разрабатываемым пластом. Преимуществом такой системы закачки пара является равномерный прогрев пласта по площади при относительно небольшом давлении закачки пара. Основными недостатками являются слабый прогрев нижней части нефтяного пласта, значительные тепlopоступления в горные выработки от систем нагнетания пара и необходимость проходки выработок в туффитовом горизонте, что требует больших капитальных затрат и увеличения сроков ввода уклонных блоков в эксплуатацию [102-104]. На 2023 год ни один уклонный блок не отрабатывается двухгоризонтной системой разработки.

При одногоризонтной системе, закачка пара и добыча нефтесодержащей жидкости происходит из буровой галереи, пробуренной на уровне подошвы нефтяного пласта. Недостатком такого способа разработки является повышенное тепловыделение от закачиваемого в пласт пара в горные выработки и неравномерный прогрев пласта.

Проанализировав преимущества обеих систем разработки и минимизировав их недостатки, была разработана подземно-поверхностная система разработки. При термошахтной добыче нефти подземно-поверхностной системой разработки происходит разбуривание нефтяного пласта скважинами из горных выработок, расположенных на уровне подошвы нефтяного пласта (буровая галерея). Теплоноситель (пар) нагнетается по сетке вертикальных скважин, пробуренных с поверхности земли [74,75,105]. Сетка скважин охватывает всю площадь пласта, обеспечивая равномерный прогрев нефтяного пласта по всей площади. В конечном итоге, массив прогревается до температуры 80-100 °С, что приводит к снижению вязкости нефти и под давлением, создаваемым нагнетательными скважинами, нефть фильтруется по пласту и поступает по добычным скважинам в выработки буровой галереи. Из горных выработок по системе канавок и трубопроводов нефтесодержащая жидкость поступает на поверхность для дальнейшей транспортировки и переработки [76,77]. Схема расположения горных выработок,

добычных и нагнетательных скважин при добыче нефти подземно - поверхностной системой разработки представлена на рисунке 3.2.

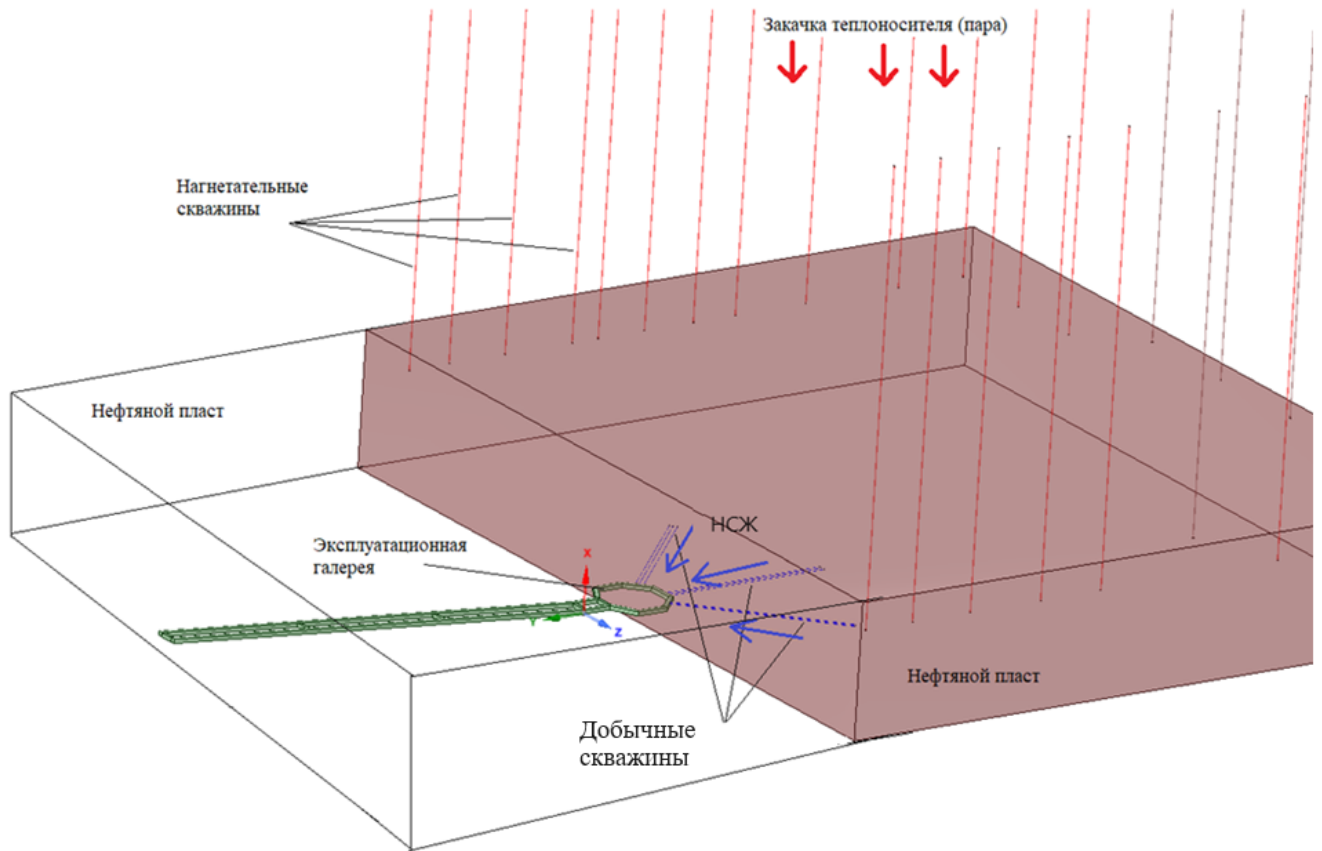


Рисунок 3.2 — Схема подземно-поверхностной системы разработки

3.1.2 Горнотехнические параметры системы разработки

Добычной единицей в нефтяных шахтах является уклонный блок. С магистральных выработок туффитового горизонта проходятся наклонные спаренные горные выработки (уклон и ходок) под углом 14-16 градусов. Уклон и ходок вскрывают нефтяной пласт, буровой выработкой может являться буровая галерея, представляющая из себя горную выработку, расположенную в форме полуокружности (галерея) в почве нефтяного пласта [52]. Блоки такого типа активно внедрялись с начала разработки Ярегского месторождения термощахтным способом, для блоков «старого» типа характерна небольшая протяженность буровой галереи (до 150 м.) и, как следствие, небольшой охват нефтесодержащего коллектора добычными скважинами. Схема расположения горных выработок уклонного блока «старого» типа представлена на рисунке 3.3

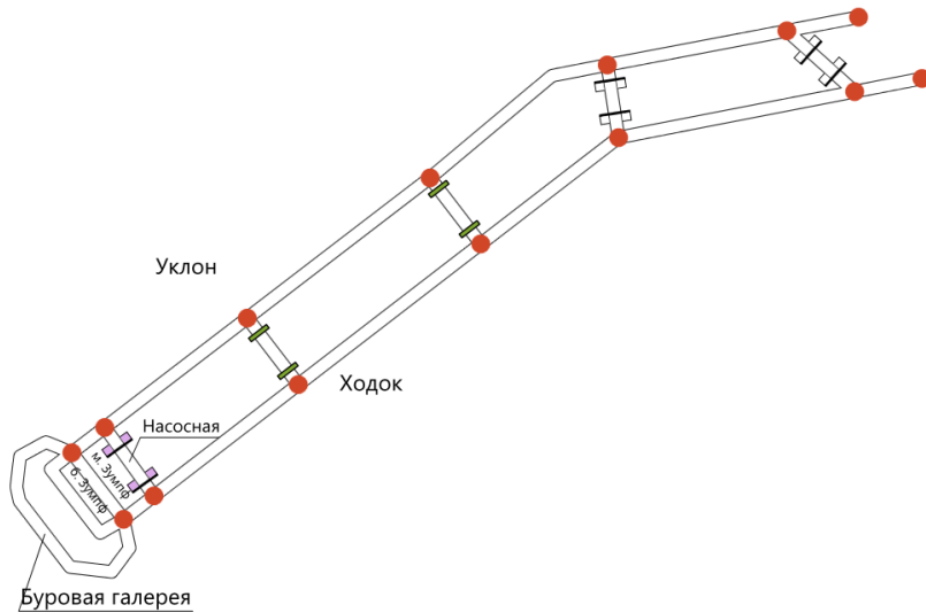


Рисунок 3.3 — Схема расположения горных выработок уклонного блока «старого» типа

Проектируемые и вводимые в эксплуатацию уклонные блоки (блоки «нового типа») имеют несколько панелей, включающих в себя откаточный, вентиляционный штрек и буровую галерею. Схема расположения горных выработок уклонного блока «нового» типа представлена на рисунке 3.4.

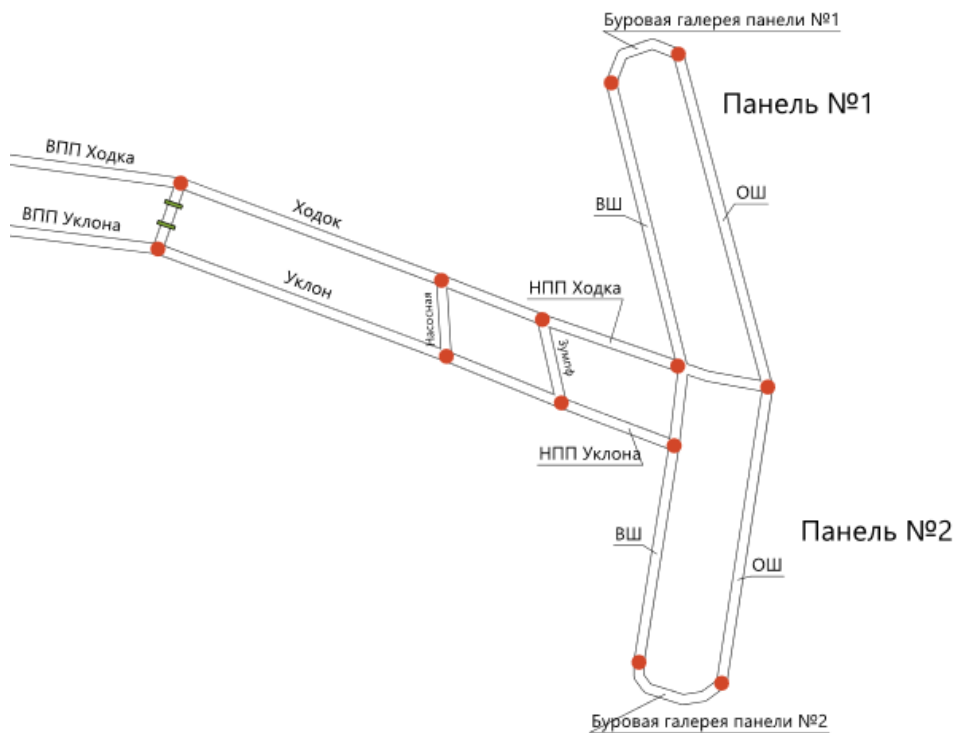


Рисунок 3.4 — Схема расположения горных выработок уклонных блоков «нового типа»

На один уклонный блок может приходиться две панели, возможно, как обособленное, так и последовательное проветривание панелей. В состав уклонного блока могут входить: людской ходок, уклон, сбойки, зумпф, насосная камера, буровая галерея, откаточный штрек панели, вентиляционный штрек панели. Из буровой галереи происходит разбуривание нефтяного пласта полого-восстающими добычными и парораспределительными скважинами.

Также существуют иные варианты обустройства уклонных блоков, существующие, как правило, такие блоки существуют в единственном числе. Пример обустройства блока представлен на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 — Схема расположения горных выработок уклонного блока

Величина тепловыделений и сложность проветривания уклонного блока, зависит от обустройства уклонного блока и расположения горных выработок. С увеличением протяженности горных выработок уклонного блока, пройденных по разогретому коллектору, увеличивается тепловая нагрузка на шахтный воздух. Так, по мере перехода от блоков «старого» типа к блокам с двумя панелями увеличивается потребность в свежем воздухе и, как следствие, в новых схемах проветривания уклонных блоков.

3.1.3 Сбор и транспортировка нефтесодержащей жидкости

Сбор нефти осуществляется по пологонаклонным скважинам, пробуренным из буровой галереи в нефтесодержащий коллектор.

Добываемая нефтесодержащая продукция из добычных скважин до места промежуточного хранения (зумпф уклона) поступает принципиально двумя способами:

Первым способом является транспортировка НСЖ по канавкам открытого или закрытого типа. НСЖ поступает в канавки открытого типа, расположенные на почве буровой галереи и за счет сил гравитации стекает в зумпф. При транспортировке НСЖ по канавкам открытого типа, возможен ее разлив за пределы канавки (см. рисунок 3.6).

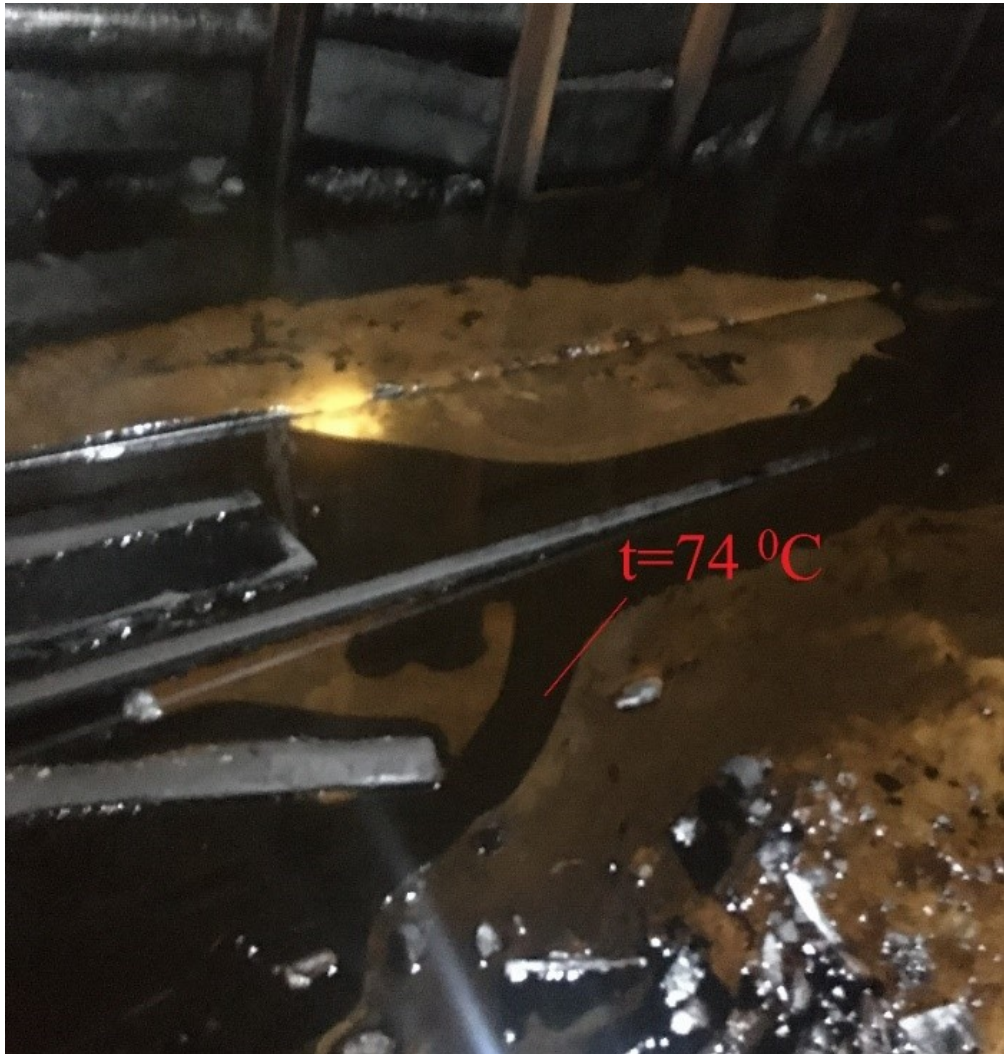


Рисунок 3.6 — разлив НСЖ по почве горной выработки

Транспортировка НСЖ по канавкам закрытого типа осуществляется следующим образом: водонефтяная смесь под действием гравитационных сил вытекает из устьев добывающих скважин и попадает в водоотливную канавку закрытого типа, дальнейшее ее перемещение до зумпфа происходит самотеком за счет проектного уклона выработок буровой галереи. При транспортировке НСЖ по канавкам закрытого типа интенсивность тепломассообменных процессов снижается, однако, ввиду негерметичного исполнения, испарение влаги полностью не исключается [54.55]. На рисунке 3.7 представлена конструкция системы транспортировки НСЖ по канавке закрытого типа.

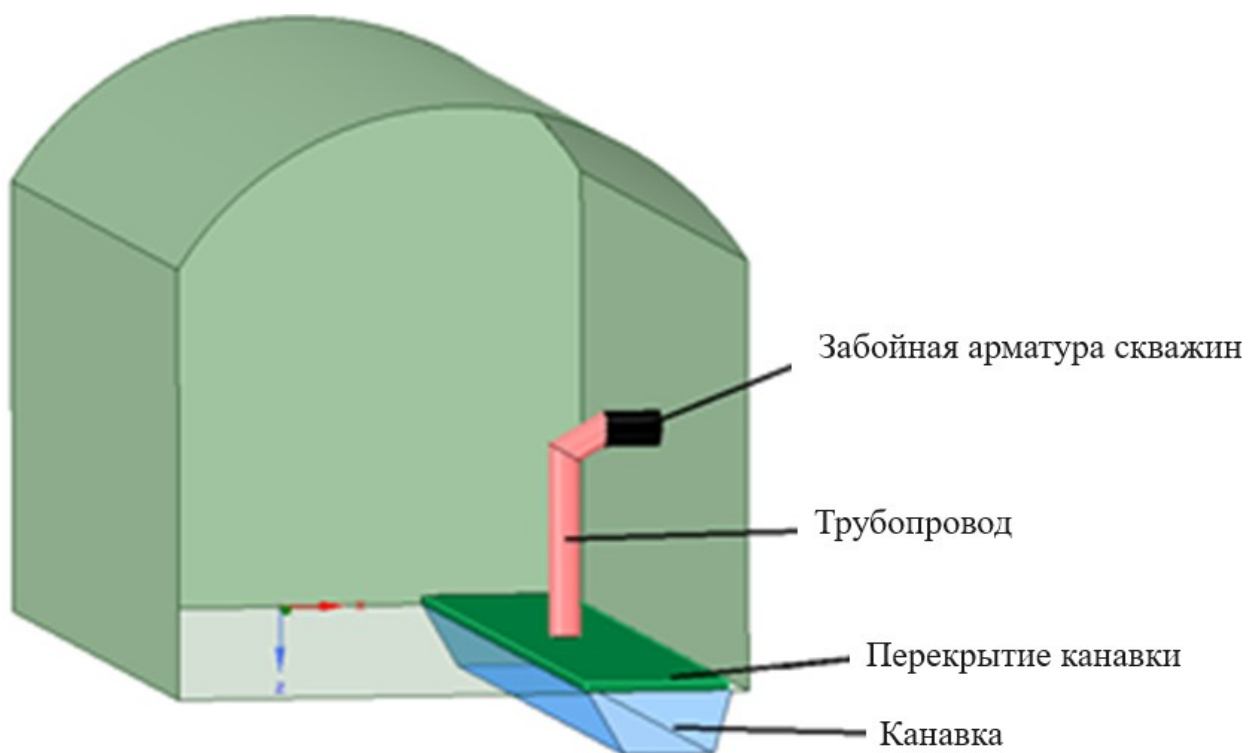


Рисунок 3.7 — Конструкция закрытой системы транспортировки нефти

Вторым способом является транспортировка НСЖ по трубопроводам. В таком случае, НСЖ поступает в систему трубопроводов, подведенных к каждой скважине, за счет сил гравитации истекает по трубопроводу в зумпф. На момент проведения исследований, таким способом транспортирование НСЖ осуществляется на одном уклонном блоке. Транспортирование НСЖ по закрытой системе трубопроводов полностью исключает массообмен между НСЖ и шахтным воздухом, однако, затрудняет обслуживание системы [14].

Из зумпфа транспортировка нефти на поверхность осуществляется двумя способами:

- С помощью насосов по системе трубопроводов нефть откачивается на песколовушку центральной нефтеперекачивающей станции (ЦНПС), расположенной у ствола шахты. Транспортировка нефти от зумпфа до песколовушки ЦНПС осуществляется по нефтепроводу (диаметр от 150 до 250 мм), который прокладывается в горных выработках с исходящей струей. В нефтесборниках нефть подогревается до температуры $+80^{\circ}\text{C}$. С центральной нефтеперекачивающей станции (ЦНПС) нефть перекачивается на поверхность, в резервуары нефтебазы.

- С помощью погружных насосов по зумпфовым скважинам, пробуренным непосредственно в зумпф уклона, нефть откачивается на поверхность и по трубопроводам транспортируется на ППСН.

3.2 Причины и статистика прорывов пара

Осложняющим фактором для осуществления прогнозирования и регулирования теплового режима горных выработок уклонных блоков является стохастически протекающий процесс выхода пара из массива по трещинам (неконтролируемый выход пара) или добычным скважинам. Учитывая анализ условий, при которых возможен выход пара и результаты многолетних наблюдений, полученные от эксплуатирующей организации - предоставляется возможность утверждать, что неконтролируемые паропоступления заметно учащаются после 7 лет разработки уклонного блока. Причиной учащения выхода пара является наличие геологических нарушений, увеличение фильтрационных свойств массива в связи с истощением нефтесодержащего коллектора ввиду интенсивной добычи на второй стадии разработки блока [93].

Выход пара из добычных скважин возможен на всем этапе разработки уклонного блока, в случае возникновения аномально высокого паропроявления через скважины – запорная арматура на устье скважины перекрывается.

Неконтролируемыми являются паропоступления из горного массива. При добыче нефти с применением подземно - поверхностной системы разработки, нефтесодержащий коллектор прогревается неравномерно [74-76], образуются зоны массива, на которых ведется более интенсивная добыча. На таких участках, возможен выход пара в горные выработки по системе трещин, при обнаружении паропроявлений, закачка теплоносителя на данный участок прекращается. Учитывая меньшую плотность пара относительно рудничного воздуха, пар устремляется к кровле выработки (см. рисунок 3.8). Остановка закачки пара в определенную область способствует перераспределению теплового воздействия на массив и интенсификации добычи на других областях данного участка.



Рисунок 3.8 — Пример выхода пара в горной выработке

Количество участков, на которых зафиксированы паропроявления из горного массива коррелируют с количеством участков с геологическими нарушениями.

Статистика по случаям выхода пара и наличия геологических нарушений на добычных участках представлена на рисунке 3.9.

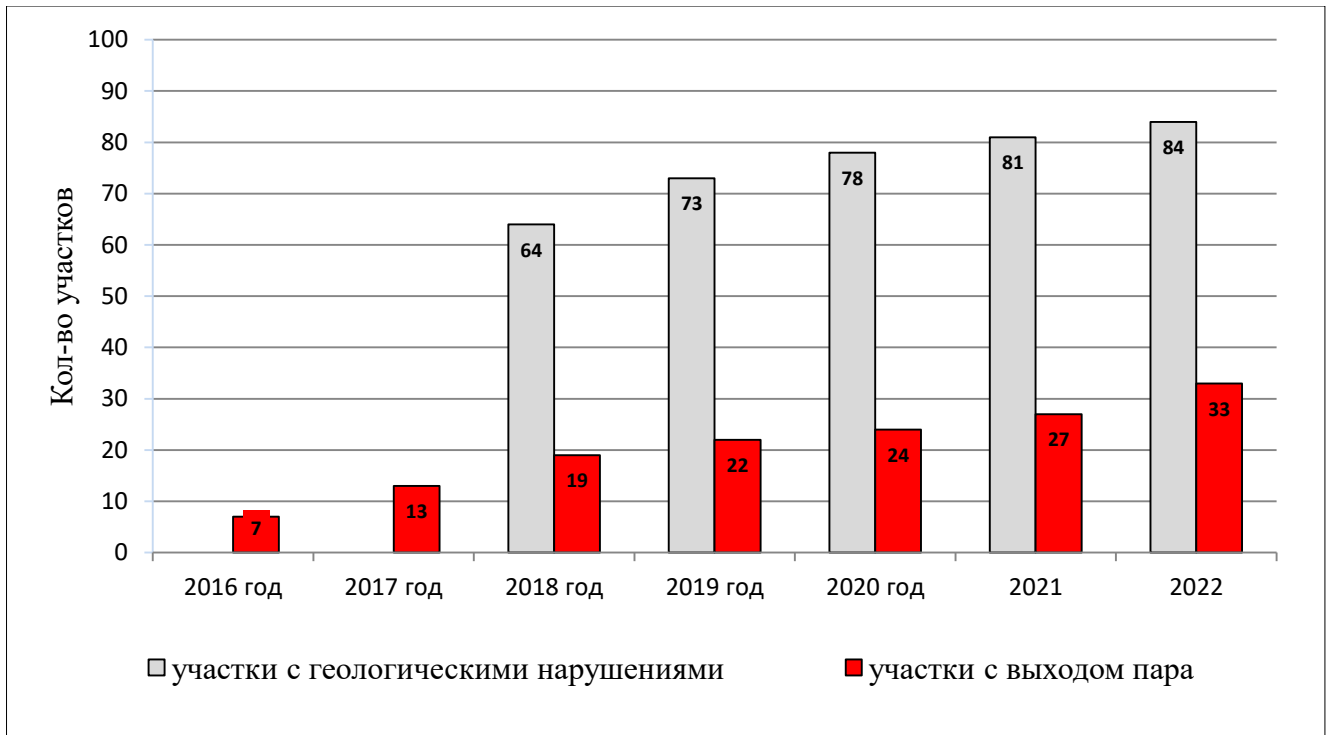


Рисунок 3.9 — Статистика случаев выхода пара и наличия геологических нарушений на добычных участках

Статистические данные по количеству и продолжительности неконтролируемых паропроявлений для блоков, находящихся на разной стадии разработки, представлены в таблице 3.1:

Таблица 3.1 — Статистические данные по количеству и продолжительности неконтролируемых паропроявлений

Критерий	Время отработки блока		
	Менее 2 лет	2-7 лет	Более 7 лет
Среднее количество паропроявлений в год	В качестве исключений в зонах геологических нарушений	1	3
Среднее время приостановления закачки пара	Не осуществляется	6 дней	11 дней

3.3 Анализ факторов, определяющих тепловой режим горных выработок нефтяных шахт

Анализ литературных источников [21,50,51,60,65] и результаты натурных наблюдений позволяют идентифицировать и классифицировать факторы, определяющие тепловой режим горных выработок нефтяных шахт (см. рисунок 3.10).

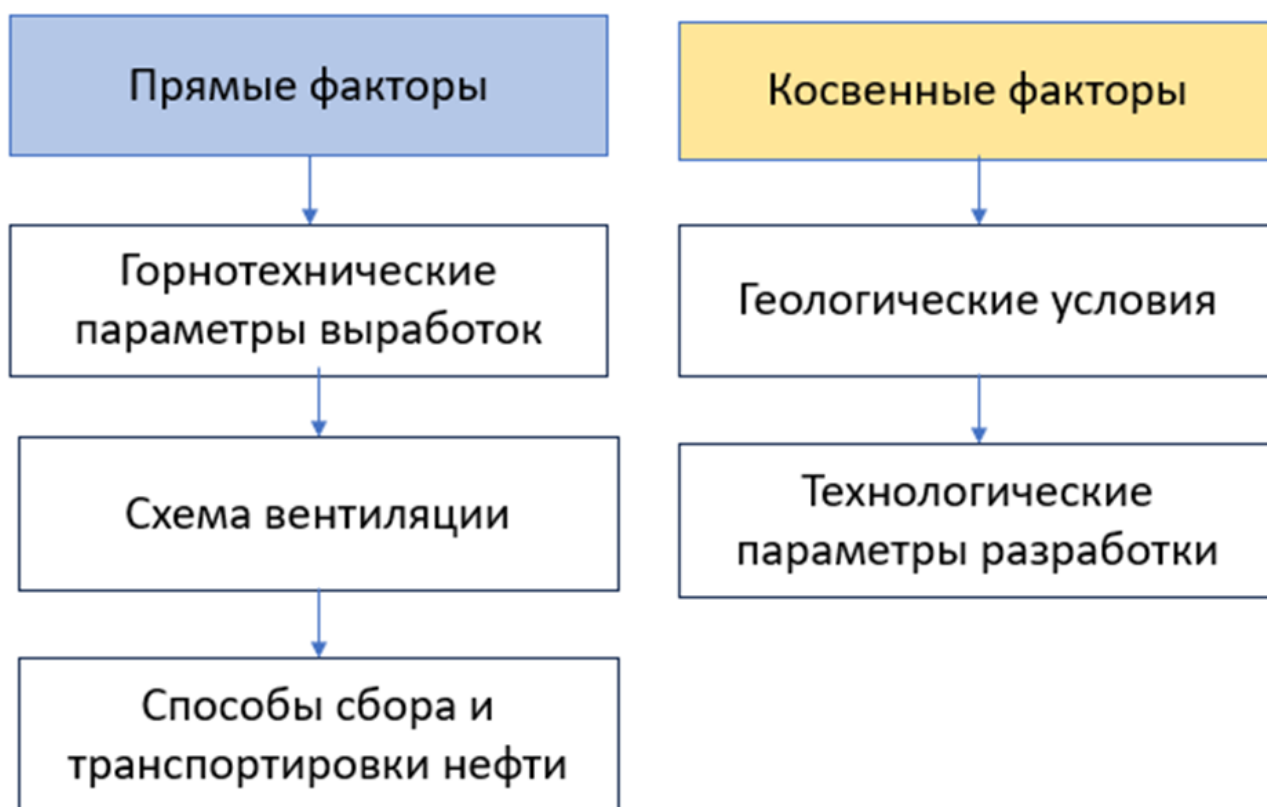


Рисунок 3.10 — Перечень факторов, определяющих безопасность добычи нефти Ярегского нефтетитанового месторождения

Прямые факторы – факторы, непосредственно влияющие на термодинамические параметры рудничного воздуха. Косвенные факторы – факторы, определяющие термодинамические и фильтрационные поля, формирующиеся в нефтесодержащем коллекторе при закачке пара [94].

Отличие прямых факторов, с точки зрения возможности регулирования, заключается в возможности минимизации тепломассообменных процессов техническими решениями (теплоизоляция и герметизация канавок и стенок выработок, изменение схемы проветривания уклонного блока). Фильтрационные и теплофизические свойства массива слабоконтролируемы и на этапе разработки

месторождения нерегулируемы в рамках существующей технологии добычи. Технологические параметры добычи, определяемые интенсивностью закачки теплоносителя, добычи нефтесодержащей жидкости и расположением добычных и нагнетательных скважин - регулируются, но ограничены с точки зрения обеспечения необходимого объёма добычи нефтяной продукции. В случае прорыва пара в горные выработки в соответствующей зоне необходимо уменьшение закачки теплоносителя [22].

По характеру воздействия (охлаждение или нагрев), факторы, оказывающие влияние на тепловой режим горных выработок, можно разделить на группы:

К факторам, снижающим температуру воздуха, относятся горные выработки туффитового горизонта или непрогретого уклонного блока, по которым движется отработанная струя воздуха от уклонных блоков или свежий воздух, имеющий температуру превышающую естественную температуру пород. Температура, исходящего из уклонных блоков воздуха, превышает 35 °С. При движении по выработкам туффитового горизонта осуществляется теплообмен между исходящей струей воздуха и массивом, при котором воздух отдает теплоту.

В блоках, в которых осуществляется прогрев нефтесодержащего коллектора, и массив прогрет до температуры, превышающей температуру подаваемого на уклонный блок воздуха, происходит нагрев воздуха. В блоках, где ведется добыча нефти, происходит истекание нефти из массива по добычным скважинам. Попадая в горные выработки, нефть транспортируется либо по открытым канавкам, закрытым канавкам или трубопроводам. Независимо от способа транспортировки, нефть оказывает тепловое воздействие на шахтный воздух, способ транспортировки определяет интенсивность тепло-массообменных процессов. В блоках, где добыча ведется по одногоризонтной системе разработки, присутствует дополнительный источник теплоты. Пар, нагнетаемый по скважинам в массив из буровой галереи, поступает по паропроводу, проложенному по горным выработкам (см. рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 — Изображение паропроводов, расположенных в буровой галерее

Технология термошахтной добычи нефти обусловлена необходимостью закачки теплоносителя (пара) в массив для его прогрева. Однако, из-за геологических особенностей нефтесодержащего коллектора, пар может достигать горных выработок по трещинам или добычным скважинам и поступать в шахтную атмосферу [95,114,115].

Перечень факторов, оказывающих нагревающее воздействие на воздух представлен на рисунке 3.12.

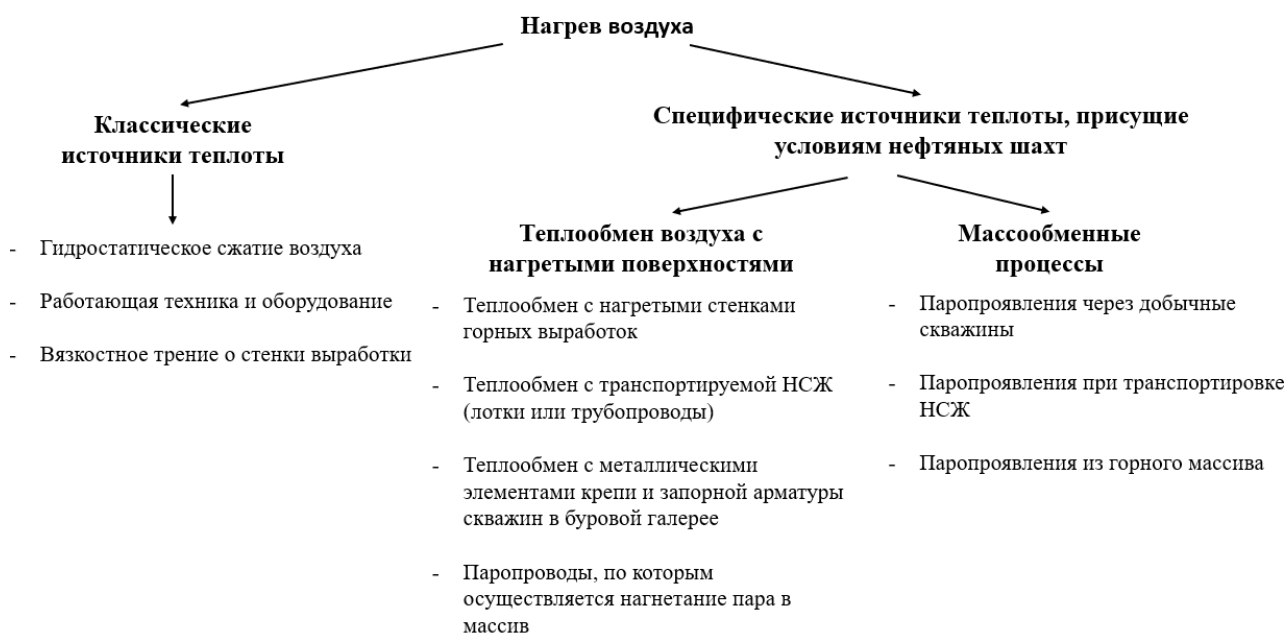


Рисунок 3.12 — Факторы, оказывающие нагревающее воздействие на рудничный воздух в условиях горных выработок нефтяных шахт

Несмотря на различие схем вентиляции, горнотехнических условий, способов транспортировки нефтесодержащей жидкости (НСЖ), доставки теплоносителя в горный массив, теплоизоляции стенок горных выработок или применения иных средств для отъёма теплоты из шахтного воздуха или минимизации тепловыделений в шахтный воздух, значение температуры воздуха горных выработок уклонных блоков превышает нормативные значения, установленные ФНП [79]. Для обеспечения рабочих зон, расположенных в горных выработках уклонных блоков, воздухом, температурой, не превышающей нормативные значения, необходимо идентифицировать и классифицировать источники тепловыделений, определить их интенсивность, в зависимости от технологических параметров термошахтной разработки и оценить возможность применения горнотехнических и теплотехнических способов регулирования теплового режима горных выработок [1].

3.4 Результаты натуральных исследований теплового режима горных выработок нефтяных шахт

3.4.1 Обзор применяемых способов регулирования теплового режима горных выработок в условиях нефтяных шахт

При проведении натуральных исследований теплового режима горных выработок уклонных блоков идентифицированы следующие мероприятия, направленные на снижение температуры воздуха в выработках:

- Теплоизоляция стенок горных выработок. В некоторых уклонных блоках на стенках горных выработок имеется теплоизоляционное покрытие. По многолетним наблюдениям, становится очевидно, что эффективность теплоизоляционного покрытия снижается уже после 1-2 лет эксплуатации. Дополнительно, подмечено неудовлетворительное состояние теплоизоляционного покрытия из минеральной ваты, в условиях повышенной влажности и наличия нефтепроявлений, срок службы покрытия значительно снижается [8,20].

- Применяются системы разбрызгивания воды (водяная завеса) в зонах повышенных значений температуры воздуха (см. рисунок 3.13) [107].

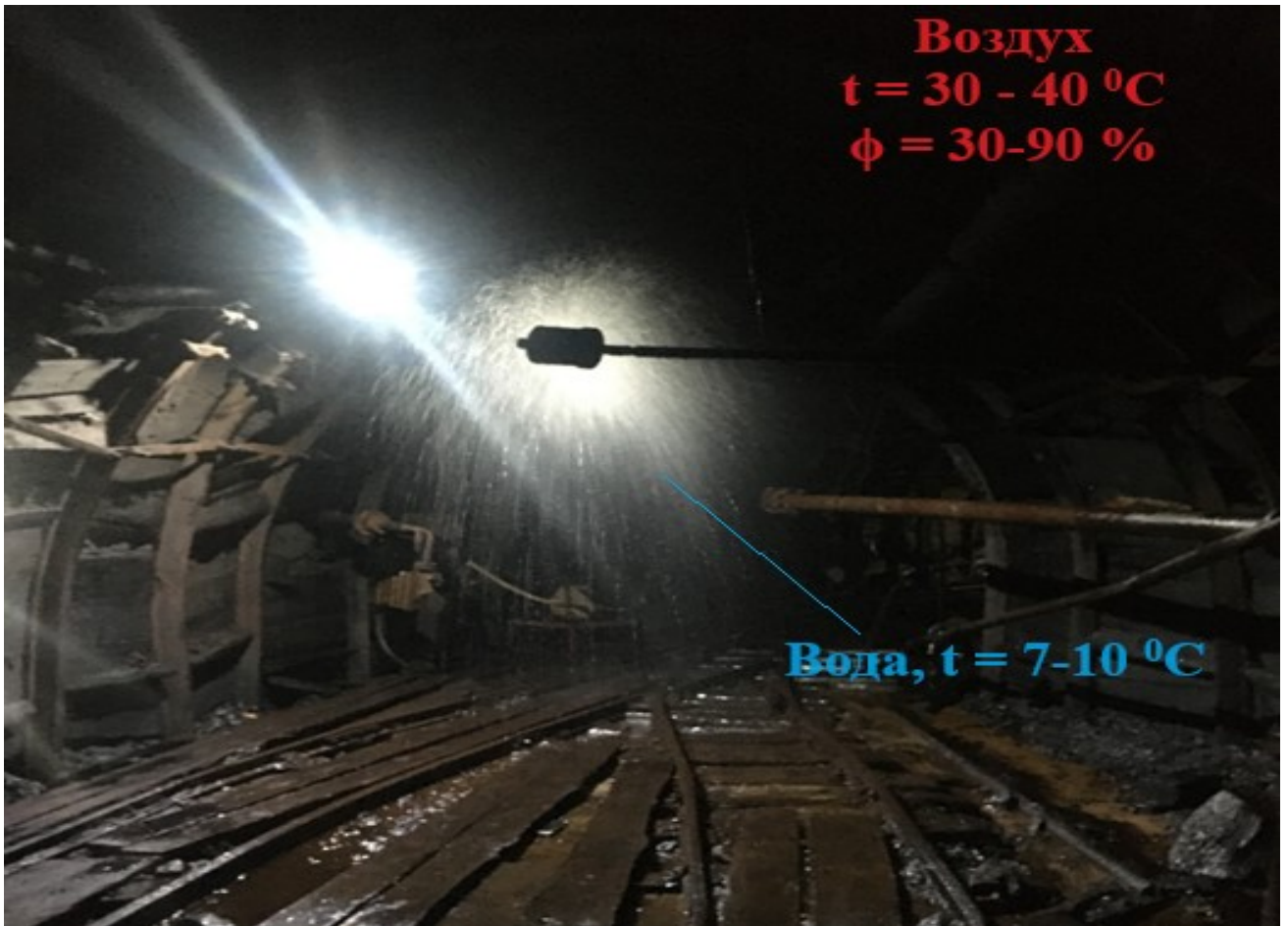


Рисунок 3.13 — Водяной заслон в условиях буровых галерей

Принцип данного способа управления тепловым режимом горных выработок заключается в адиабатическом охлаждении воздуха за счет использования тепловой энергии воздуха на испарение влаги. При протекании данного процесса, происходит переход явной теплоты в скрытую. Скрытая теплота характеризуется теплотой парообразования водяного пара. При таком переходе, энтальпия влажного воздуха остается постоянной, однако уменьшается ее температура и увеличивается влагосодержание [41].

С точки зрения эффективности снижения температуры воздуха, больший эффект достигается при испарении большего количества влаги, однако испарение влаги ограничено влажностью воздуха, поступающего к зоне орошения. В условиях нефтяных шахт, влажность воздуха в уклонных блоках составляет от 40 % до 80 % при температуре воздуха более 30 °C. Для сравнения, выбраны показательных 3 участка с температурой воздуха +30 °C и влажность воздуха 40 %, 60 % и 80 %. На рисунке 3.14 представлены параметры воздуха на этих участках до

и после водяной завесы. Точкам 1,3,5 соответствует состояние воздуха до водяной завесы, точкам 2,4,6 соответственно состояние воздуха после водяной завесы.

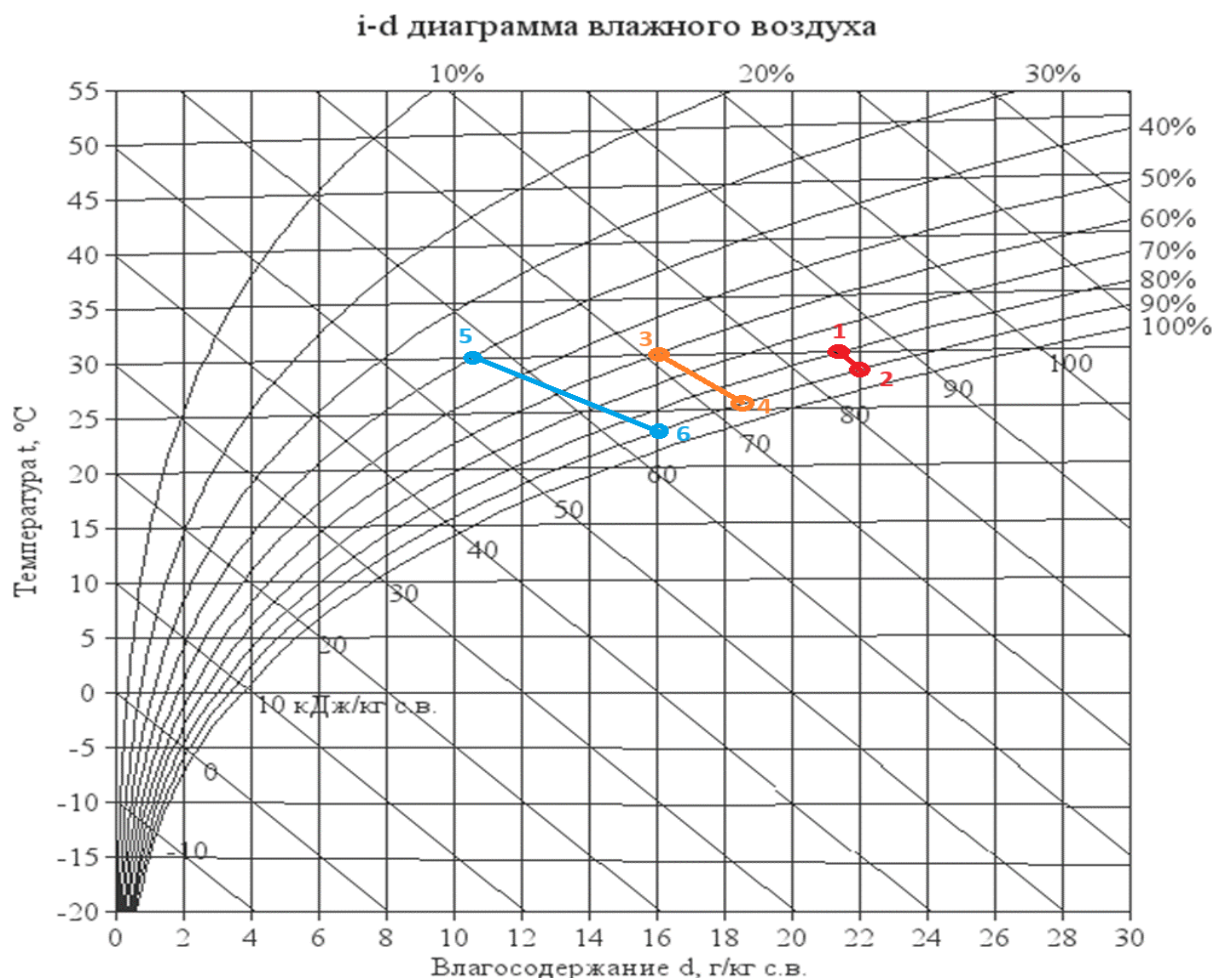


Рисунок 3.14 — Параметры воздуха до и после водяной завесы

Из результатов натуральных исследований, следует, что наибольший эффект по снижению температуры воздуха за счет водяных завес осуществляется в зонах с меньшей влажностью. В большинстве исследуемых блоках влажность воздуха в буровых галереях превышает 80 %.

- Для минимизации поступления пара совместно с добываемой нефтью на устье добычных скважин устанавливаются пароуловители. Конструкция пароуловителя подразумевает конденсацию поступающего в него пара, тем самым, достигается снижение паропроявлений через скважины, однако сам пароуловитель нагревается до значений 80-90 °С (см. рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 — Пароуловитель в условиях нефтяных шахт

3.4.2 Методика проведения натуральных исследований теплового режима горных выработок

Требования к местам определения термодинамических параметров рудничного воздуха определяются необходимостью одновременного измерения, скорости, температуры, влажности воздуха, температуры стенок горной выработки, транспортируемой НСЖ, поверхностей металлических элементов крепи и забойной арматуры скважин.

Проведение натуральных измерений термодинамических параметров в горных выработках было выполнено с соблюдением следующих условий в местах проведения замеров:

- Измерения в горных выработках уклонного блока, выполнены в равных условиях для каждой замерной станции в рамках уклонного блока, в момент, не соответствующий времени выполнения технологической операции «продувки» скважин или других операций, являющихся причиной внезапного приращения энтальпии воздуха.

- В пункте замера обеспечивается устойчивый вентиляционный поток. Сечение выработки в месте проведения замера не нагромождено оборудованием, оказывающим влияние на характер движения воздуха.

Измерение термодинамических параметров шахтного воздуха (температура воздуха, $t^{\circ}\text{C}$; влажность воздуха, φ , %, скорость воздуха, v , м/с), а также, определяющих их факторов: температура поверхности стенок горных выработок, температура транспортируемой нефтесодержащей жидкости, металлических элементов крепи и забойной арматуры скважин, выполнены в выработках уклонных блоков (зумпф, ходок, уклон, буровая галерея, вентиляционный штрек (ВШ) и откаточный штрек (ОШ) панелей, насосная, нижняя приемная площадка ходка и уклона).

В таблице 3.2 представлены уклонные блоки нефтяных шахт, их технологические параметры, протяженности блоков и бур галерей / панелей, количество точек замеров в панели и на уклонном блоке в целом.

Таблица 3.2 — Параметры уклонных блоков нефтяных шахт и количество пунктов замеров

№ п/п	Наименование Уклонного блока		Система разработки	t отработки блока, лет	Lма ршрута, м	Lбур. галерей / панелей, м	Кол-Во бур. гал. / панелей	Кол-во точек замеров всего
1	«Блок №11»		Подземно-поверхностная	9	472	102	1	10
2	«Блок №6»	Панель 1		10	1685	362	2	26
		Панель 2		10		587		
3	«Блок №13»	Панель 1		6	606	129	2	23
		Панель 2		6	667	167		
4	«Блок №12»			Однгоризонтная	10	547	121	1
5	«Блок №8»	Панель 1	8		1096	664	2	32
		Панель 2			921	400		
6	«Блок №4»	Панель 1	1,5	557	180	2	17	
		Панель 2		702	65			
7	«Блок №3»	Панель 1	1,5	898	118	2	17	
		Панель 2			235			
8	«Блок №2»	Панель 1	Подземно-поверхностная	Менее 1 года	864	450	2	29
		Панель 2			1017	601		

Продолжение таблицы 3.2

№ п/п	Наименование Уклонного блока	Система разработки	t отработки блока, лет	Лмаршрута, м	Лбур. галерей / панелей, м	Кол-Во бур. гал. / панелей	Кол-во точек замеров всего	№ п/п
9	«Блок №1»	Панель 1		Менее 1 года	1204	882	2	25
		Панель 2			1500	905		
10	«Блок №9»	Панель 1		более 8 лет	1920	1050	3	24
		Панель 2			1360	490		
		Панель 3			405	45		
11	«Блок №14»	Подземно-поверхностная		Более 16 лет	580	110	1	10
12	«Блок №10»			более 8 лет	738	270	1	12
13	«Блок №13»			более 13 лет	645	115	1	10
14	«Блок №9»			более 3 лет	565	240	1	5
Всего:					18849	8288	23	250

3.4.3 Результаты исследования уклонного блока

В качестве примера в таблице 3,3 и рисунках 3.16-3.21 представлены результаты исследования уклонного блока №6. Аналогичные результаты получены по остальным уклонным блокам, в которых проводились измерения (14 блоков).

Таблица 3.3 — Результаты измерения расходов воздуха в выработках блока №6

Участок	Название выработки	S, м ²	V, м/с	Q, м ³ /с
Общие выработки	Уклон	8,5	1,59	13,5
	Людской ходок	8,5	1,27	10,8
	Насосная			4,9
	Зумпф			0,8
Панель 1	ОШ	8,5	0,63	5,1
	ВШ	8,4	0,61	5,1
	Буровая галерея	8,5	0,63	5,1
Панель 2	ОШ	8,5	0,88	7,5
	ВШ	8,5	0,56	4,8
	Буровая галерея	8,6	0,87	7,5
	Вент. скважина			2,5



Рисунок 3.16 — Воздухораспределение на уклонном блоке 6

Измерения проводились по пути движения воздуха по блоку, начиная с ходка (пункт замера №2) и заканчивая уклоном (пункт замера №26), расположение точек замеров представлено на рисунке 3.17.

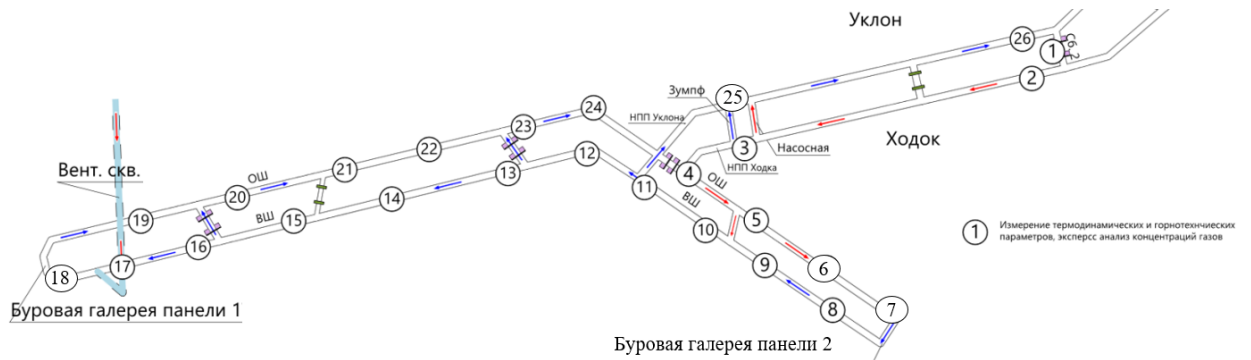


Рисунок 3.17 — Схема расположения пунктов замеров термодинамических и горнотехнических параметров

Результаты замеров термодинамических параметров, согласно местам проведения измерений (рисунок 3.17) в уклонном блоке №6 представлены на рисунке 3.18.

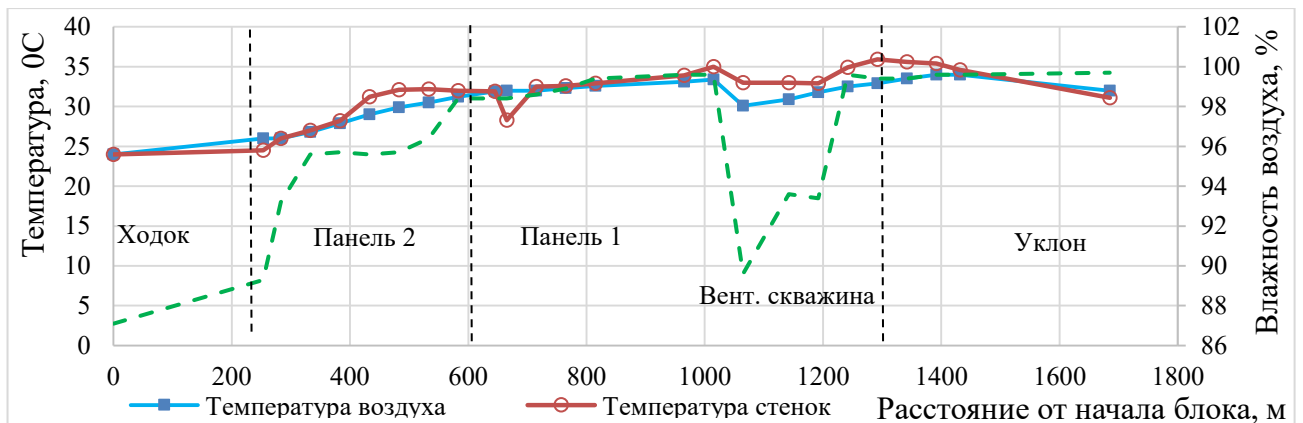


Рисунок 3.18 — Результаты измерения термодинамических параметров уклонного блока №6

Результаты измерения температуры воздуха, транспортируемой нефти, стенок выработки, металлических элементов крепи и скважин по панели 1 и панели 2 представлены на рисунке 3.19 и рисунке 3.20 соответственно.

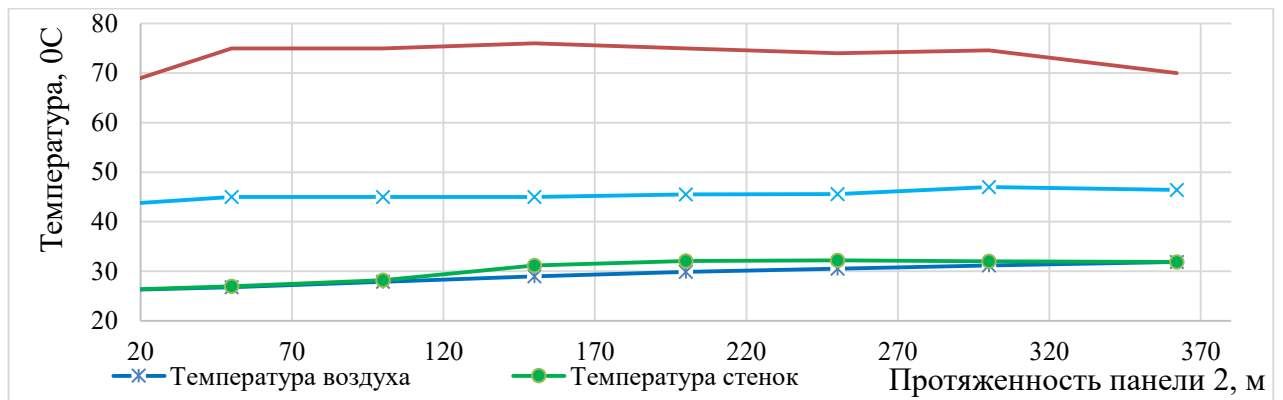


Рисунок 3.19 — Результаты измерения термодинамических параметров панели 2

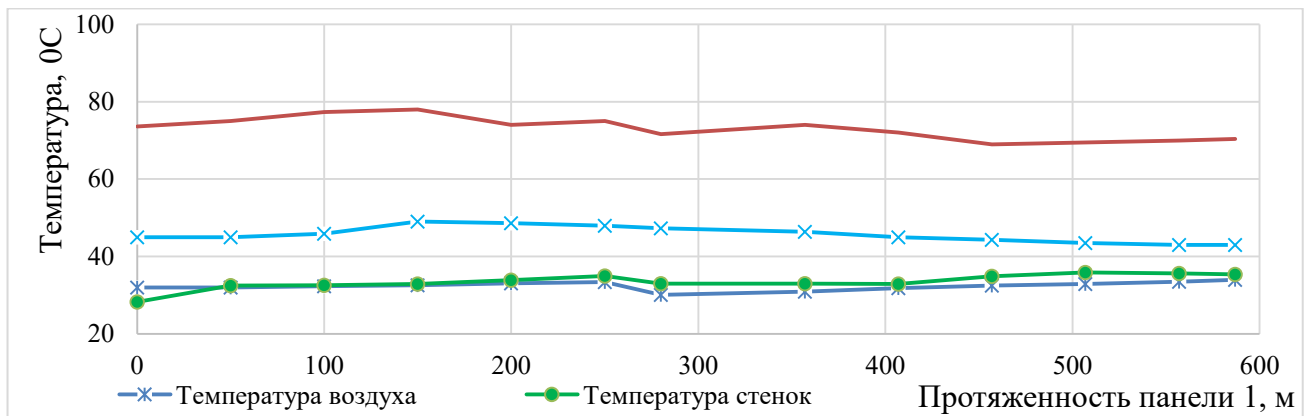


Рисунок 3.20 — Результаты измерения термодинамических параметров панели 1

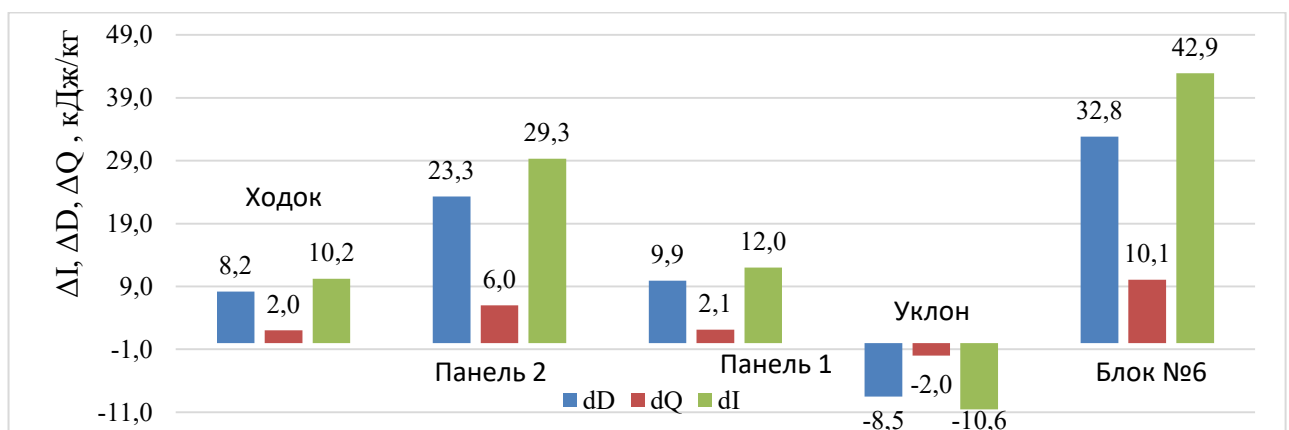


Рисунок 3.21 — Структура тепловыделений в горных выработках блока №6

В состав уклонного блока входит 2 панели Панель 1 и Панель 2), панели проветриваются последовательно. В панели 1, в центре панели находится

вентиляционная скважина, по которой происходит подсыживание воздушной струи. Из анализа структуры тепловыделений в горных выработках уклонного блока №6, видно, что приращение энтальпии воздуха наибольшее на панели 2 это связано с тем, что поступающий на панель воздух имеет температуру порядка 26 °С, что меньше температуры поверхности горных выработок и транспортируемой нефти, в следствие чего, воздух по пути движения по панели нагревается. В панели 1, продолжается нагрев воздуха, однако, воздух, подаваемый по вентиляционной скважине подсыживает струю воздуха, движущуюся по панели, что приводит к снижению температуры воздуха с 35 °С до 30,1 °С и уменьшению влажности воздуха с 98 % до 90%. После чего, воздух продолжает нагреваться до 33,5 °С.

Аналогичные исследования выполнены для других уклонных блоков. В конечном итоге, измерения выполнены для 14 уклонных блоков, имеющих различные горнотехнические и технологические параметры. Результаты замеров термодинамических параметров воздуха, для блоков, в которых проводилось исследование, представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 — Результаты измерений параметров температурного режима горных выработок

Блок	t ₁ , °С	t ₂ , °С	φ ₁ , %	φ ₂ , %	Q, м ³ /с	L, м
Блок №1	25,50	21,30	71,10	77,0	9,20	882,0
Блок №2	16,10	12,90	67,10	75,60	7,60	446,0
Блок №4	20,60	32,80	62,0	77,0	4,70	180,0
Блок №3	19,60	31,90	54,0	85,0	7,90	235,0
Блок №9	23,10	43,0	71,90	74,0	4,24	240,0
Блок №6	26,0	32,1	71,0	98,0	5,1	362
Блок №7	22,0	32,0	0,12	0,42	11,6	138
Блок №8	23,60	40,0	40,0	61,30	14,60	664,0
Блок №9	26,90	45,60	55,30	79,0	10,90	1095,0
Блок №10	27,50	38,0	42,0	98,0	9,50	270,0
Блок №11	21,0	32,0	47,0	84,0	9,20	102,0
Блок №12	25,0	32,60	48,20	54,0	14,40	121,0
Блок №13	23,0	35,20	68,0	86,0	13,90	115,0
Блок №14	20,0	32,50	70,0	82,0	12,50	110,0

Для выявления закономерностей формирования теплового режима горных выработок нефтяных шахт необходимо обобщение результатов натуральных исследований и их сопоставление со временем (стадий) разработки уклонного блока.

3.5 Анализ результатов натуральных исследований

Количество уклонных блоков с температурным режимом, превышающем 26 °С, находящемся в пределах 26-36 °С и превышающем 36 °С представлены в таблице 3.5:

Таблица 3.5 — Температурный режим в исследуемых уклонных блоках

Температурный режим	Количество уклонных блоков, шт			Итого
	Шахта №1	Шахта №2	Шахта №3	
До 26°С	2	-	-	2
от 26°С до 36°С	2	2	1	5
более 36°С	3	1	3	7
Итого	7	3	4	14

В рамках проведения натуральных исследований выполнены измерения температуры стенок горных выработок буровых галерей. Установлено, что вокруг исследуемых выработок в массиве формируется неоднородное температурное поле. Результаты измерений температур поверхностей горных выработок (почвы, кровли, нефтяного пласта и «холодной» стенки) по блокам, находящимся на разных стадиях разработки сведены в зависимости, характеризующие динамику температур поверхностей буровых галерей по мере продолжительности эксплуатации уклонного блока и представлены на рисунке 3.22.

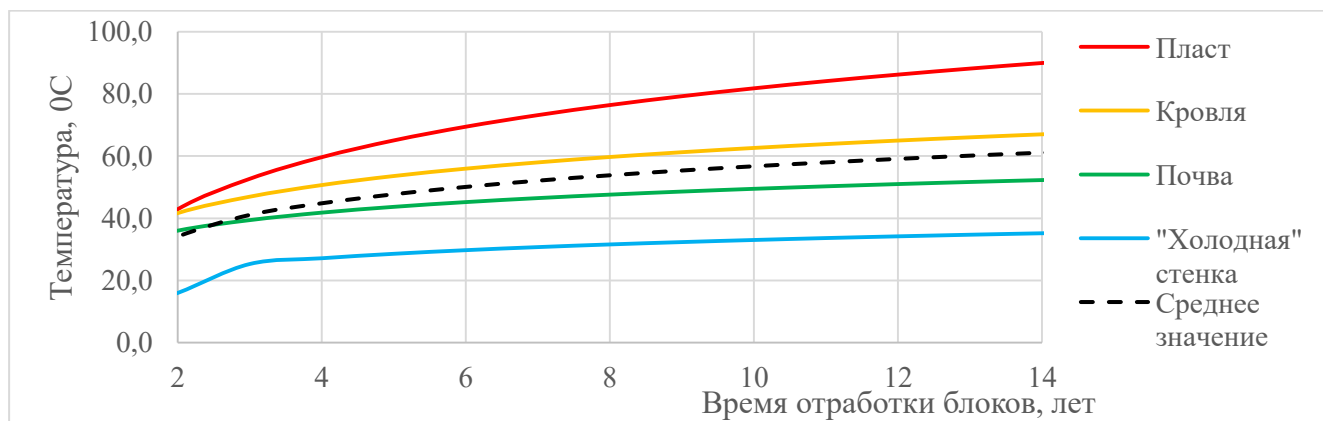


Рисунок 3.22 — Динамика температуры поверхностей буровых галерей по мере разработки уклонных блоков

На основе обобщения результатов натуральных исследований и данных мониторинга технологических параметров разработки, получены зависимости, характеризующие динамику температуры НСЖ, стенок выработок и дебита нефти по мере продолжительности разработки блока и представлены на рисунке 3.23.

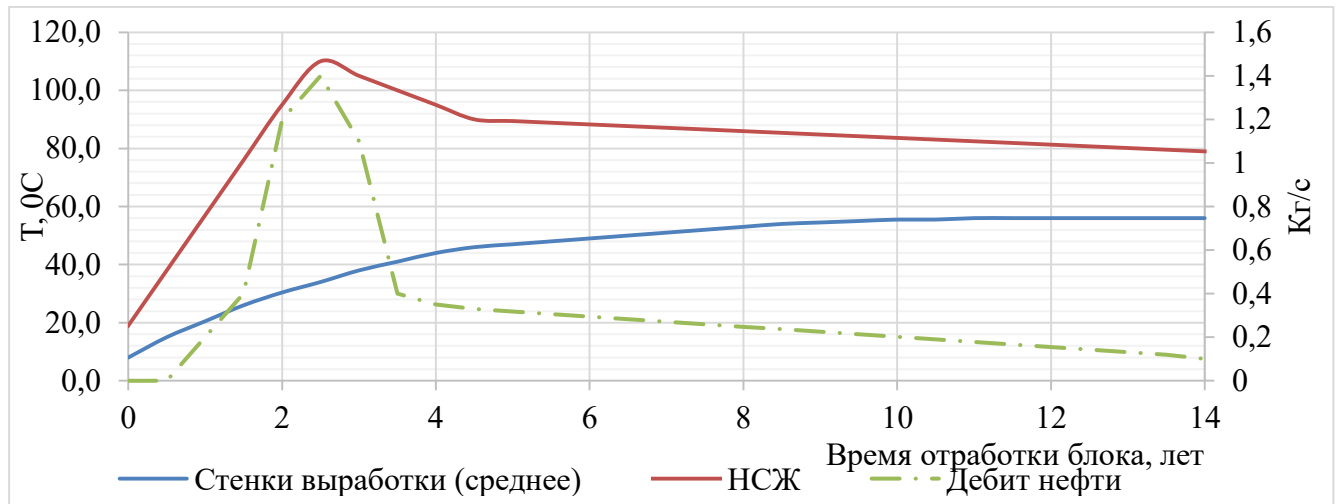


Рисунок 3.23 — Динамика температуры стенок выработки, дебита и температуры нефти в зависимости от стадии разработки блока

Для оценки величины теплоступлений в горных выработках уклонных блоков, выполнены расчёты изменения скрытой, явной теплоты и энтальпии воздуха по формулам:

- Приращение явной теплоты шахтного воздуха определяется по выражению 3.1:

$$\Delta Q = 1,005 \Delta t, \quad (3.1)$$

где Δt - изменение температуры воздуха в выработке, °C; 1,05 – удельная теплоёмкость воздуха, кДж/ (кг·°C)

- Приращение скрытой теплоты шахтного воздуха (изменение влагосодержания воздуха) определяется по выражению 3.2:

$$\Delta D = r \Delta d, \quad (3.2)$$

где Δd - изменение влагосодержания в выработке г/кг, определяется по выражению 3.3;

r – теплота парообразования воды (принимается равным 2300 кДж/кг.).

$$\Delta d = 0,622 \frac{(P_{н.н.2} \varphi_2 - P_{н.н.1} \varphi_1)}{P}, \quad (3.3)$$

где $P_{н.н.i}$ - давление насыщенного пара в точке замера, Па;

φ_i – относительная влажность воздуха в точке замера, доли ед.

- Приращение энтальпии воздуха определяется из выражения 3.4:

$$\Delta I = \Delta D + \Delta Q \quad (3.4)$$

Результаты замеров температуры и влажности воздуха в начале и в конце горных выработок уклонного блока, наибольшее значение температуры воздуха в выработке, а также, результаты расчета приращения явной, скрытой теплоты и энтальпии воздуха представлены в таблице 3.6. Отрицательные значения приращения энтальпии воздуха соответствуют выработкам, для которых характерно уменьшение теплосодержания рудничного воздуха, в таких выработках происходит снижение его температуры и/или влагосодержания, в таких блоках добыча нефти не осуществляется.

Таблица 3.6 — Тепловой режим исследуемых уклонных блоков

Выработка	t поступа ющего воздуха, °C	t исходяще го воздуха, °C	T _{ма} кс, °C	Влажность поступающ его воздуха, %	Влажность исходящег о воздуха, %	dQ, кДж /кг	dD, кДж /кг	dI, кДж/кг
Блок №11»								
Блок №11	20	35	35	48	75,3	15,1	47,7	62,8
Ходок	20	21	21	48	48,4	1,0	1,2	2,3
Буровая галерея	21	32	34	48,4	75,1	11,1	36,3	47,4
Уклон	32	35	35	75,1	75,3	3,0	10,2	13,2
Блок №б								
Блок №б	24	32	34	87,1	93,2	10,1	32,8	42,9
Ходок	24	26	26	87,1	93,2	2,0	8,2	10,2
Панель 1	26	32	32	93,2	98,4	6,0	23,3	29,3
Панель 2	31,9	34	34	98,4	99,6	2,1	9,9	12,0
Уклон	34	32	34	99,6	99,7	-2,0	-8,5	-10,6
Блок №13								
Блок №13	22	33,5	40,1	53	91,1	11,6	50,8	62,3
Ходок	22	27	27	53	57,5	5,0	10,0	15,0

Продолжение таблицы 3.6

Выработка	t поступа ющего воздуха, °C	t исходяще го воздуха, °C	T _{ма} кс, °C	Влажность поступающ его воздуха, %	Влажность исходящег о воздуха, %	dQ, кДж /кг	dD, кДж /кг	dI, кДж/кг
Панель 1	21,5	32	38	61	77	10,6	32,2	42,7
Панель 2	21,5	39,6	40,1	61	89	18,2	74,5	92,7
Уклон	38,5	33,5	38,5	88	91,1	-5,0	- 19,5	-24,6
Блок №12								
Блок №12	24,5	33,6	33,6	48	60,4	9,1	25,5	34,7
Ходок	24,5	24,8	24,8	48	48,2	0,3	0,5	0,8
Буровая галерея	24,8	32,6	32,6	48,2	58,4	7,8	20,9	28,7
Уклон	32,6	33,6	33,6	58,4	60,4	1,0	4,1	5,1
Блок №8								
Блок №8	21,3	35,8	42,3	38	81	14,6	58,2	72,8
Ходок	21,3	23,5	23,5	38	39	2,2	2,6	4,8
Панель 1	23,6	42,3	42,3	40	91	18,8	98,3	117,1
Панель 2	25,8	37,2	37,2	49,2	100	11,5	72,2	83,7
Уклон	38,8	35,8	38,8	66,6	81	-3,0	2,4	-0,6
Блок №4								
Блок №4	20	26,7	32,8	60	69,5	10,2	24,0	34,1
Ходок	20	20,6	20,6	60	62	0,6	1,6	2,2
Буровая галерея	22,3	28,51	28,5	62	69	6,2	15,6	21,8
Панель 1	20,6	29,7	29,7	65	76	11,6	32,7	44,3
Уклон	32,8	26,7	32,8	73,4	69,5	-2,3	-9,3	-11,6
Блок №3								
Блок №3	18	26,1	33,6	54	87	8,1	28	36,2
Ходок	18	19	19	54	54	1,0	1,1	2,1
Панель 2	19	33,6	33,6	54	90	14,7	53,6	68,3
Панель 1	32,6	31,9	29,6	85	85	-0,7	-2,5	-3,2
Уклон	31,9	26,1	31,9	85	87	-5,7	- 16,5	-21,9
Блок №2 (пар не нагнетается)								
Блок №2	17,2	12,8	17,2	63	73,6	-4,4	-2,3	-6,7
Ходок	17,2	16,1	17,2	63	67,1	-1,1	-0,1	-1,2
Панель 1	15,7	12,9	15,7	82,3	76,8	-2,8	-5,0	-7,8
Панель 2	16,4	12,5	16,4	67,1	82,3	-3,9	-0,9	-4,8
Уклон	16,7	12,8	16,7	77,6	73,6	-3,9	-5,9	-9,9
Блок №1 (пар не нагнетается)								

Продолжение таблицы 3.6

Блок №1	27,3	21,4	27,3	72	73,6	-5,9	-	11,3	-17,2
Ходок	27,3	25,4	27,3	72	72,5	-1,9	-4,0	-5,9	
Панель 1	25,1	21,3	25,1	72,4	78	-3,0	-3,3	-6,4	
Панель 2	25,4	22,4	25,4	71,1	77,1	-3,8	-5,1	-8,9	
Уклон	22,3	21,4	22,3	75	73,6	-0,9	-2,2	-3,1	
Блок №9									
Блок №9	19	35,7	45,6	67	73	16,8	42,8	59,6	
Ходок	19	25,1	25,1	67	65	6,1	9,2	15,3	
Панель 1	25,3	45,6	45,6	64	99,8	20,4	119,5	139,9	
Панель 2	28,5	35,6	35,6	46,1	54	7,1	20,6	27,7	
Панель 3	31,4	38	38	82,7	84	6,6	27,0	33,7	
Уклон	40,3	35,7	40,3	59	73	-4,6	-2,4	-7,0	
Блок №14									
Блок №14	16	33	33	67,5	64	17,1	30,5	47,6	
Ходок	16	20	20	67,5	68	4,0	5,6	9,6	
Буровая галерея	20	32,5	32,5	68	64	12,6	38,6	51,2	
Уклон	32,5	33	33	84	64	0,5	-13,6	-13,1	
Блок №10									
Блок №10	19	35,6	35,6	67	54	16,7	25,5	42,2	
Ходок	19	25,1	25,1	67	65	6,1	9,2	15,3	
Буровая галерея	25,3	45,6	45,6	4	99,8	20,4	119,5	139,9	
Уклон	28,5	35,6	35,6	46,1	54	7,1	20,6	27,7	
Блок №13									
Блок №13	20	41	41	46	86	21,1	86	107,1	
Ходок	20	24	24	46	49	4,0	5,9	9,9	
Буровая галерея	24,5	42,2	42,2	63	92	17,8	87,1	104,9	
Уклон	41	41	41	87	86	0	-1,2	-1,2	
Блок №9									
Блок №9	18	42	43	62,8	74	24,1	73,1	97,2	
Ходок	18	22	22	62,8	64	4,0	6,1	10,1	
Буровая галерея	23,1	43	43	71,9	78	20,0	72,1	92,1	
Уклон	42	42	42	75	74	0	-1,3	-1,3	

Уклонный блок разрабатывается до 18 лет. Однако на разных этапах разработки, тепловое воздействие на пласт характеризуется изменением темпов закачки пара и увеличением проницаемости нефтесодержащего коллектора. В

зависимости от степени разработки участка, на тепловой режим горных выработок оказывают влияние различные источники теплоты. Для подтверждения данной гипотезы сопоставлены температурные параметры стенок выработки, транспортируемой НСЖ, изменения термодинамических параметров воздуха со временем (стадий) разработки блока. Результаты натурных измерений теплового режима горных выработок, выполненных в условиях уклонных блоков, позволяют определить количество теплоты, передаваемой в рудничный воздух от определенных источников.

Отношение теплоступлений от транспортируемой нефтесодержащей жидкости $Q_{\text{НСЖ}}$ к тепловыделениям от стенок горных выработок $Q_{\text{стенок}}$ в буровой галерее для всей продолжительности разработки уклонного блока представлено на рисунке 3.24

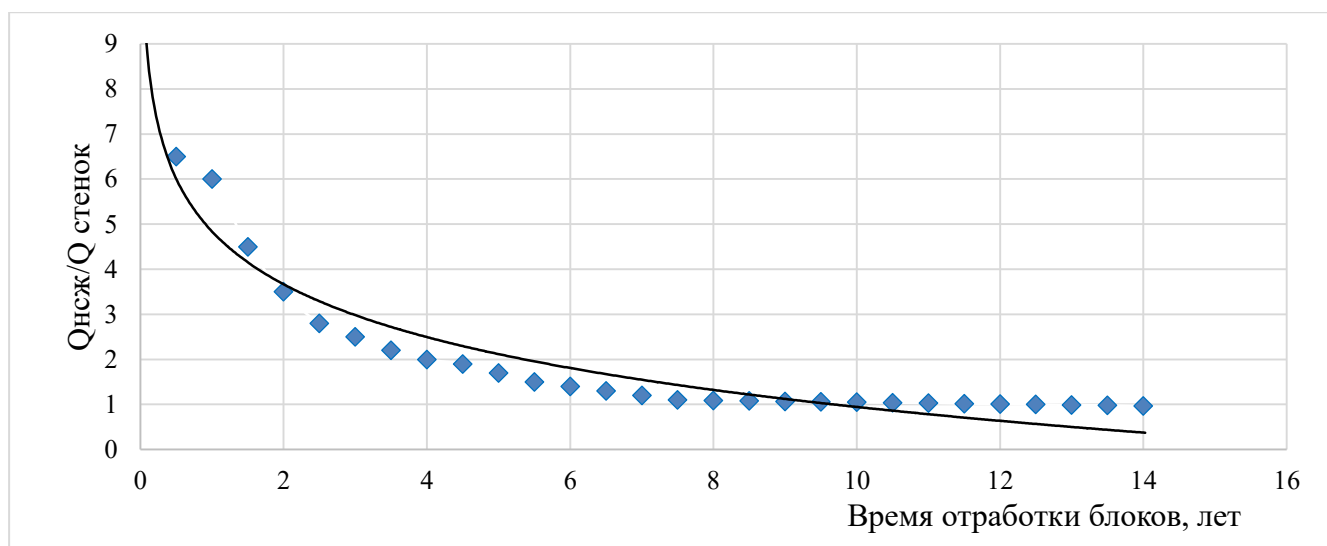


Рисунок 3.24 — Динамика отношения теплоступлений от нефтесодержащей жидкости к теплоступлениям от стенок выработок

Результаты, представленные на рисунке 3.24 свидетельствуют об изменении структуры теплового баланса по мере разработки блока.

Анализ закономерностей изменения, вычисленных по формулам (3.1) – (3.4) энтальпии рудничного воздуха свидетельствует о том, что при увеличении продолжительности эксплуатации блока происходит повышение удельного приращения энтальпии воздуха, данная закономерность отражена на рисунке 3.25.

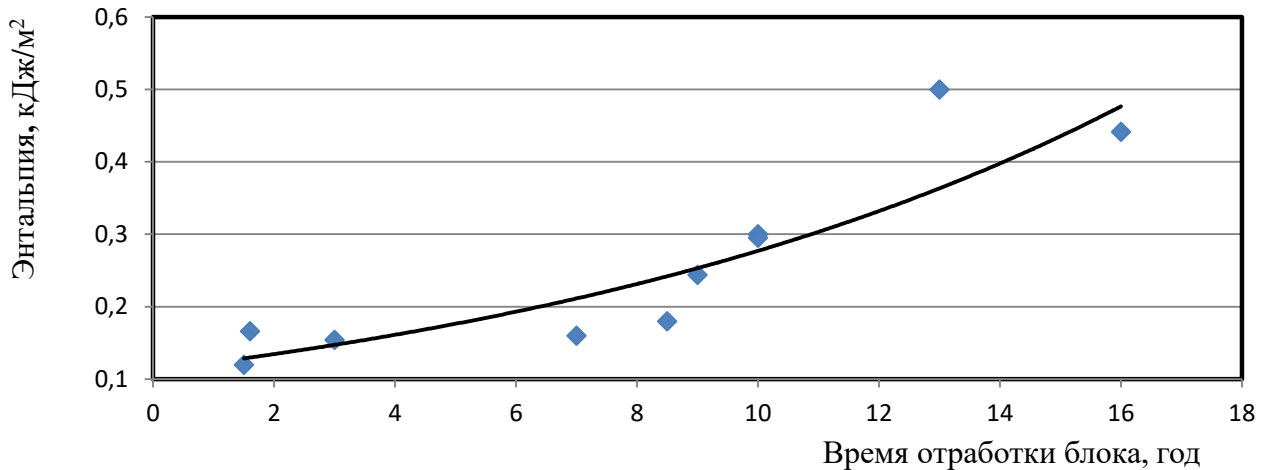


Рисунок 3.25 — Удельное приращение энтальпии воздуха в буровой галерее, в зависимости от времени разработки блока

Из результатов расчетов (рисунок 3.25) видно, что происходит увеличение удельного приращения энтальпии воздуха с увеличением продолжительности эксплуатации блока. Это объясняется продвижением теплового фронта от нагнетательных скважин к горным выработкам, а также, увеличением интенсивности массообменных процессов (паропроявления).

Для определения изменчивости структуры теплового баланса определена динамика отношения доли скрытой теплоты к явной теплоте рисунок 3.26.

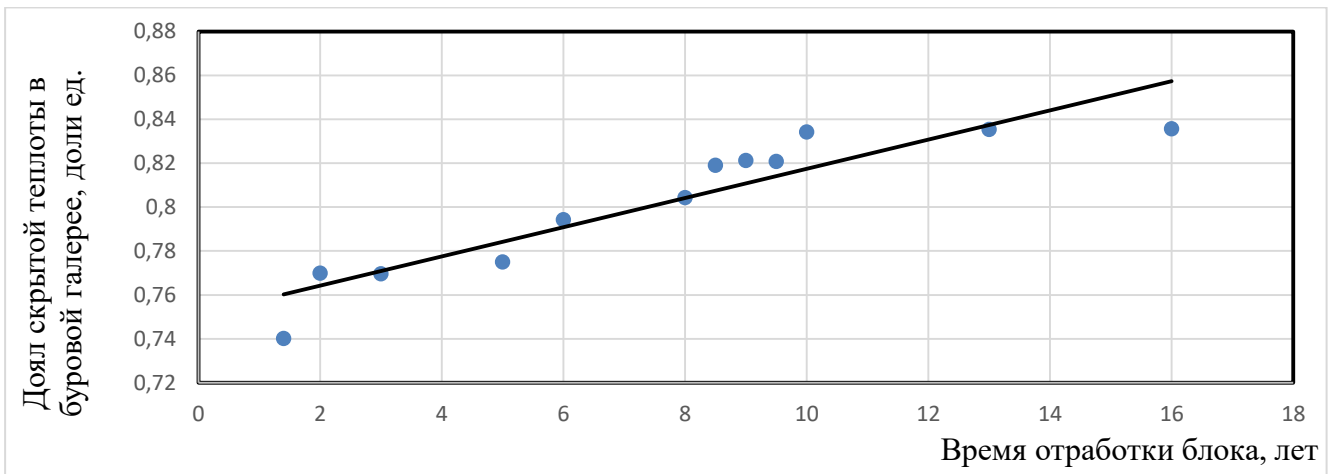


Рисунок 3.26 — Соотношение между скрытой и явной теплотой в буровой галерее в зависимости от времени разработки блока

Увеличение доли скрытой теплоты по отношению к явной теплоте по мере разработки блока увеличивает, что подтверждает увеличение массообменных процессов в структуре теплового баланса рудничного воздуха.

Из результатов натуральных исследований, представленных в главе 3.4 и в главе 3.5 определены доли тепловыделений от стенок выработки, транспортируемой НСЖ и паропроявлений по мере разработки уклонного блока и представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 — Значимость тепловыделений от различных источников теплоты по мере разработки уклонного блока

Источник теплоты	Доля тепловыделений, % (Указаны значения доли тепловыделений в начале и в конце этапа)		
	1 стадия (до 3 лет)	2 стадия (3-7 лет)	3 стадия (более 7 лет)
НСЖ	100-50	50-20	20-0
Стенки выработок	0-50	50-40	40-0
Паропроявления	0	0-40	40-100

Исходя из зависимостей, представленных на рисунках 3.24 - 3.26, и в таблице 3.7, воздействие теплоносителя на тепловой режим горных выработок можно разделить на 3 стадии:

- Первая или начальная стадия разработки уклонного блока характеризуется закачкой большого объема пара для быстрого разогрева пласта. На уклонных блоках, разрабатываемых на Ярегском месторождении, начальная стадия длится до 3 лет. В этот период происходит резкий рост температуры пласта и добываемой жидкости, увеличивается дебит нефти и возрастает температура воздуха в выработках. Основным источником тепловыделений в эксплуатационную галерею на первой стадии разработки является нефтесодержащая жидкость (НСЖ), ее температура постепенно увеличивается и к концу этапа может достигать 110 °С. Температура стенки со стороны нефтяного пласта постепенно увеличивается до 40 °С. Дебит нефти монотонно возрастает до пикового значения 1,4 кг/с.

- На второй стадии объемы закачки пара снижаются до параметров, требуемых для поддержания температуры пласта 50-60°С. Длительность второй стадии 3-7 лет от начала разработки уклонного блока. Этот этап разработки характеризуется уменьшением температуры добываемой нефтесодержащей жидкости и дебита нефти. Температура стенки со стороны нефтяного пласта остается постоянной и равной 70°С, что является основной причиной постоянства температуры воздуха в выработках.

- В период третьей стадии (от 7 лет разработки блока), учащаются прорывы пара в рудничную атмосферу, что требует контроля закачиваемого пара и, в случае необходимости, уменьшения объемов его закачки на отдельных участках. Температура добываемой жидкости снижается. Температура стенок выработок остается на прежнем уровне, продолжается снижение добычи нефти [13,15,73,108].

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что структура теплового баланса горных выработок уклонных блоков изменяется с течением времени по мере разработки блока. Для эффективного управления тепловым режимом буровых галерей уклонных блоков необходимо учитывать структуру тепловыделений и неоднородность температурного поля, формирующегося вокруг них.

3.6 Выводы по главе 3

1. На настоящем этапе развития технологий по разработке высоковязких месторождений нефти, не предоставляется возможным полноценное извлечение нефти из нефтесодержащего коллектора традиционными способами добычи нефти. При термошахтном способе добычи нефти, удаётся добиться КИН =0,7 в лучшие годы и 0,5 в среднем при разработке месторождений высоковязких нефтей неглубокого залегания, что подтверждает перспективу термошахтной добычи нефти.

2. Прогрев нефтесодержащего коллектора является обязательным условием для эффективной добычи нефти. Закачиваемый в массив теплоноситель (пар) по добычным скважинам и системам трещин может поступать в горные выработки нефтяных шахт, оказывая значительное влияние на термодинамические параметры рудничного воздуха.

3. Определено четыре технологических особенности добычи, определяющих тепловой режим горных выработок уклонных блоков: способ закачки пара, способ транспортировки НСЖ, горнотехнические параметры уклонного блока, схема вентиляции уклонного блока.

4. По мере отработки уклонного блока, структура тепловыделений изменяется. На первой стадии преобладают тепловыделения от транспортируемой

НСЖ, на второй стадии от НСЖ и от стенок горных выработок, на третьей стадии учащаются прорывы пара в рудничную атмосферу.

5. Неконтролируемое поступление пара (прорывы) через трещины и геологические нарушения оказывает значительное тепловое воздействие на рудничный воздух в выработках уклонных блоков. Количество прорывов и удельная доля тепlopоступлений в рудничный воздух от пара в структуре теплового баланса уклонного блока повышается по мере увеличения продолжительности разработки уклонного блока.

6. Для прогнозирования и управления тепловым режимом горных выработок, необходимо разработать методикy, в которой предоставляется возможным учитывать уникальные источники теплоты и неоднородность температурного поля, формирующегося в массиве, окружающем горные выработки уклонных блоков.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ОСНОВЕ ВАРИАНТНЫХ РАСЧЁТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКЕ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Адаптация существующей методики расчёта теплоступлений для условий нефтяных шахт

Существующие методы расчёта термодинамических параметров воздуха в шахтах и рудниках, в том числе методика, разработанная в Горном университете под руководством проф. Дядькина Ю.Д. [34.35], не учитывает выявленные в процессе натуральных измерений закономерности формирования теплового режима добычных выработок нефтяных шахт, в частности сложную динамику температуры нефтяного коллектора, прогреваемого в результате закачки пара, определяющую температуры поверхностей обнажений нефтяного коллектора, пород кровли и почвы, находящихся с ним в контакте, непостоянства факторов, определяющих тепловой режим горных выработок, а также тепловой эффект пара, периодически поступающего в эксплуатационную галерею, пройденную по нефтяному коллектору с температурой $T_{п} = 95^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$ [127].

На рисунке 4.1 представлена принципиальная схема распределения источников теплоты в буровой галерее.

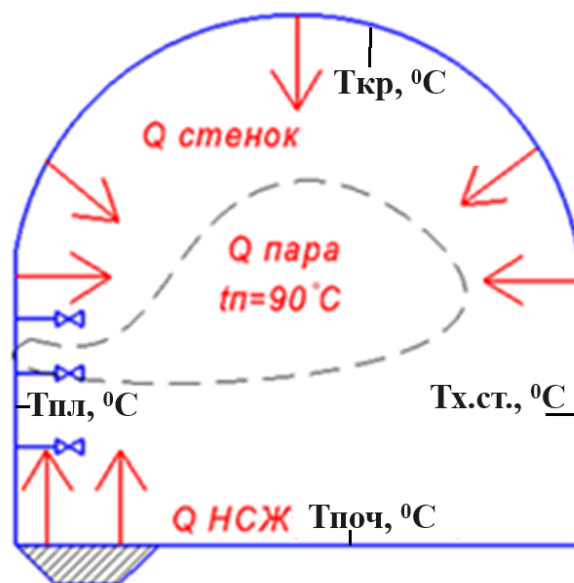


Рисунок 4.1 — Схема распределения теплоты в буровой галерее

где $Q_{\text{стенки}}$ – теплоступления от теплообмена рудничного воздуха со стенками (тепловой поток от кровли, почвы, пласта и «холодной» стенки различен и характеризуется температурой поверхности выработки) $Q_{\text{пара}}$ - поступающего по добычным скважинам или трещинам и $Q_{\text{нсж}}$ – тепловыделения от транспортируемой НСЖ (конвективным теплообменом и массообменные процессы).

На основании обработки данных натуральных измерений установлено, что средние температуры поверхностей обнажений нефтяного пласта, кровли, почвы и стенки, противоположной обнажению нефтяного пласта, определяются с достаточной для инженерных расчетов точностью (корреляционное соотношение не менее 0,9) зависимостями (Таблица 4.1).

Таблица 4.1 — Средние температуры поверхностей обнажения горного массива, окружающего эксплуатационную галерею

Поверхность выработки	Средняя температура поверхности обнажения
Нефтяной пласт	$T_{\text{об.пл.}} = 24,17\ln(\tau) + 26,146$
Кровля	$T_{\text{об.кр.}} = 13,023\ln(\tau) + 32,638$
Почва	$T_{\text{об.пч.}} = 24,17\ln(\tau) + 26,146$
Противоположная обнажению нефтяного пласта поверхность выработки («Холодная» стенка»)	$T_{\text{пр.ст.}} = 6,4164\ln(\tau) + 18,2659$

В свою очередь, количество поступающего пара было определено по разнице между значениями температур воздуха в конце буровой галереи для случаев поступления пара из нефтяного коллектора и его отсутствия. При этом расход пара $Q_{\text{пар}}$ изменялся в интервале 0,01-0,02 кг/с.

Установленные значения $T_{\text{об.пл.}}$, $T_{\text{об.кр.}}$, $T_{\text{об.пч.}}$, $T_{\text{пр.ст.}}$ и $Q_{\text{пар}}$ учитывались в дифференциальном уравнении теплового баланса, описывающем квазистационарную стадию теплообмена между рудничным воздухом, горным массивом, поступающим в эксплуатационную галерею паром и нефтесодержащей жидкости в лотке.

Относительно температуры рудничного воздуха дифференциальное уравнение теплового баланса может быть представлено в виде 4.1:

$$(1 + gy) \frac{dt}{dy} = -At + B \quad (4.1)$$

где коэффициенты А, В и g, зависящие от показателей, определяющих теплообмен в системе рудничный воздух, неоднородный горный массив, нефтесодержащая жидкость в лотке и поступающий из нефтяного коллектора пар, устанавливаются по формулам 4.2 - 4.3:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^4 (a_{т.и} U_i + k_{т.л} U_l + r_{п} \frac{760}{P} \Delta \varphi n + C_{п} q_{п} \Delta \eta(y))}{G c_{эф}} \quad (4.2)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^4 (a_{т.и} U_i T_i) + k_{т.п.л.} u_l \theta_{н.с.ж.} - r_{п} \frac{760}{P} \Delta \varphi m + (C_{п} q_{п} T_{п} + r q_{п} \Delta \eta(y))}{G c_{эф}} \quad (4.3)$$

$$g = \frac{760 r \Delta \varphi}{P C_{эф}} \quad (4.4)$$

В зависимостях (4.1 и 4.2) у – продольная координата, м; t – температура воздуха, °С; $c_{эф}$ – эффективная теплоёмкость, определяемая по формуле 4.5, Дж/(кг °С); G – весовой расход воздуха, кг/с; U – периметр обнажений нефтяного пласта (i=1), кровли (i=2), почвы (i=3), поверхности, противоположной обнажению нефтяного пласта (i=4), м; $k_{т.и.}$, $k_{т.п.л.}$ - коэффициенты теплопередачи от воздуха соответственно к поверхности горного массива и нефтесодержащей жидкости в лотке, Вт/(м²град.); $\theta_{н.с.ж.}$ - температура нефтесодержащей жидкости, °С; $r_{п}$ – удельная теплота испарения (конденсации пара, Дж/кг; $C_{п}$ – теплоёмкость пара, Дж/(кг °С); $q_{п} = Q_{пар}/(l_k - l_n)$; $\Delta \varphi$ – изменение относительной влажности на участке j буровой галереи, доли ед. (j=1,2,3); $\Delta \varphi = \varphi_{j,n} - \varphi_{j,k}$; m и n – коэффициенты из аппроксимационной зависимости влагосодержания насыщенного пара от температуры кг/кг, кг(кг °С); $\Delta \eta(y)$ - единичные функции Хевисайда, определяемый по формуле 4.6.

$$C_{\text{эф}} = C_p + \frac{760}{p} r \varphi_{\text{н},j} n \quad (4.5)$$

$$\Delta\eta(y) = \eta(y - l_{\text{н}}) - \eta(y - l_{\text{к}}) \quad (4.6)$$

$\eta(y - l_{\text{н}}), \eta(y - l_{\text{к}})$ – единичные функции Хевисайда. $l_{\text{н}}, l_{\text{к}}$ – расстояния от входа и эксплуатационную галерею соответственно до начала и конца участка с поступлением пара, м. $\eta(y - l_{\text{н}}), \eta(y - l_{\text{к}}) = 0$, при $y \leq l_{\text{н}}$ и 1 при $y > l_{\text{н}}, l_{\text{к}}$

Уравнение 4.1 дополняется дифференциальным уравнением 4.7 теплового баланса относительно температуры нефтесодержащей жидкости $\theta_{\text{н.с.ж.}}$ в лотке.

$$c_{\text{н.ж.}} W_{\text{н.ж.}} \frac{d\theta_{\text{н.с.ж.}}}{dy} = -k_{\text{т.п.л.}} U_{\text{л}} (\theta_{\text{н.с.ж.}} - t) \quad (4.7)$$

По существу, уравнение 4.1 распадается на три уравнения, описывающих распределение температуры воздуха на трёх последовательных участках буровой галереи ($j=1,2,3$) и отличающихся отсутствием или поступлением пара в рудничный воздух. При этом, конечные термодинамические параметры воздуха на каждом предыдущем участке принимаются в качестве начальных для последующего участка.

Решение этого уравнения для участка j , характеризующегося поступлением пара, при начальной температуре $t_{j=1,\text{к}}$, поступившей с предыдущего участка, относительно конечной температуры $t_{j=2,\text{к}}$ имеет стандартный вид (4.8):

$$t(y) = \frac{B}{A} + (At_0 - B)(1 + gy)^{-A/g} \quad (4.8)$$

При отсутствии поступления пара в воздух буровая галерея рассматривается как единая выработка с длиной $L_{\text{гал}}$. При этом, члены $C_{\text{п}}q_{\text{п}}$ и $q_{\text{п}}(C_{\text{п}}T_{\text{п}} + r)$ в формулах 4.2 и 4.3 принимаются равными нулю.

4.2 Учёт тепlopоступлений от источников теплоты, характерных для условий горных выработок нефтяных шахт

Тепловыделения от транспортируемой нефти ($Q_{\text{нсж}}$, Вт), движущей по канавке, определяются по формуле 4.9 [127].

$$Q_{\text{нсж}} = F_{\text{нсж}} [\alpha(t_{\text{нсж}} - t_{\text{в}}) + \beta(p_{\text{н}}^{t_{\text{нсж}}} - \varphi_{\text{ср}} p_{\text{н}}^{t_{\text{в}}})] \quad (4.9)$$

где β – коэффициент теплоотдачи испарением, Вт/(м²с·°С·Па), определяемый по формуле 4.11;

$F_{\text{НСЖ}}$ – поверхность теплоотдачи НСЖ, м²;

α – коэффициент теплоотдачи от поверхности транспортируемой НСЖ к воздуху, Вт/(м² °С), определяемый по формуле 4.10;

$t_{\text{в}}, t_{\text{НСЖ}}$ – температура воздуха и средняя температура НСЖ, °С; $p_{\text{н}}^{t_{\text{НСЖ}}}$ – парциальное давление насыщенных водяных паров в воздухе при температуре НСЖ, Па.; $p_{\text{н}}^{t_{\text{в}}}$ парциальное давление насыщенных водяных паров при температуре воздуха в начале выработки, Па; $\varphi_{\text{ср}}$ – средняя относительная влажность воздуха в долях единицы [121].

$$\alpha_{\text{нефти}} = \frac{9,4 \cdot V^{0,8}}{d^{0,2}} \quad (4.10)$$

$$\beta = \alpha \frac{1500 + 2,75(t_{\text{НСЖ}} + t_{\text{в}})}{P} \quad (4.11)$$

где P – барометрическое давление воздуха в горной выработке, Па.

Тепловыделения от трубопроводов для транспортировки нефти ($Q_{\text{тр}}$, Вт) рассчитываются по формуле [14].

$$Q_{\text{тр}} = k_{\text{т.п.тр}} F_{\text{тр}} (\theta_{\text{ср}} - t_{\text{в}}) \quad (4.12)$$

где $k_{\text{т.п.тр}}$ – коэффициент теплопередачи от поверхности трубопровода к воздуху, Вт/(м² °С); $F_{\text{тр}}$ – поверхность трубопровода, м²

$\theta_{\text{ср}}$ – средняя температура НСЖ в трубопроводе, °С [67].

$$k_{\text{т.п.тр}} = \frac{1}{\frac{1}{a_{\text{внутр}}} + \frac{\delta_{\text{тр}}}{\lambda_{\text{тр}}} + \frac{1}{a_{\text{внеш}}}} \quad (4.13)$$

где $\delta_{\text{тр}}$ – толщины стенки трубопровода, м;

$\lambda_{\text{тр}}$ – коэффициенты теплопроводности стенки трубопровода, Вт/(м·К);

$a_{\text{внутр}}$ и $a_{\text{внеш}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности трубопровода к транспортируемой НСЖ и внешней стенки к воздуху, Вт/(м² °С) [20,34,121]

$$a_{\text{внутр}} = \frac{\lambda_{\text{н}}}{D} \text{Nu} \quad (4.14)$$

$\lambda_{\text{н}}$ -коэффициент теплопроводности нефти, D -внутренний эквивалентный диаметр трубопровода, Nu - число Нуссельта, зависящее от режима течения нефти в трубопровода, рассчитывается по М.А. Михееву [68].

Теплопоступления от пара, прорывающегося в горные выработки ($Q_{\text{п}}$, Вт) можно рассчитать по формуле:

$$Q_{\text{п}} = C_{\text{п}} q_{\text{п}} U_{\text{гал}}' (T_{\text{п}} - t_{\text{в}}) L_{\text{гал}} \quad (4.15)$$

где $C_{\text{п}}$ – теплоемкость пара, Дж/кг $^{\circ}\text{C}$; $q_{\text{п}}$ – удельный массовый расход пара, кг/($\text{м}^2\text{с}$); $U_{\text{гал}}'$ – периметр буровой галереи за вычетом ширины, м; $T_{\text{п}}$ – температура пара, $^{\circ}\text{C}$; $L_{\text{гал}}$ – протяженность буровой галереи, м.

4.3 Верификация методики расчёта температуры воздуха в условиях нефтяных шахт

Верификация разработанной методики осуществлялась на основании сопоставления результатов расчётов с данными натурных исследований, которые осуществлялись в периоды паропроявлений и отсутствия пара. Результаты верификации при наличии различных источников теплоты на исследуемом участке представлены на рисунках 4.2-4.3.

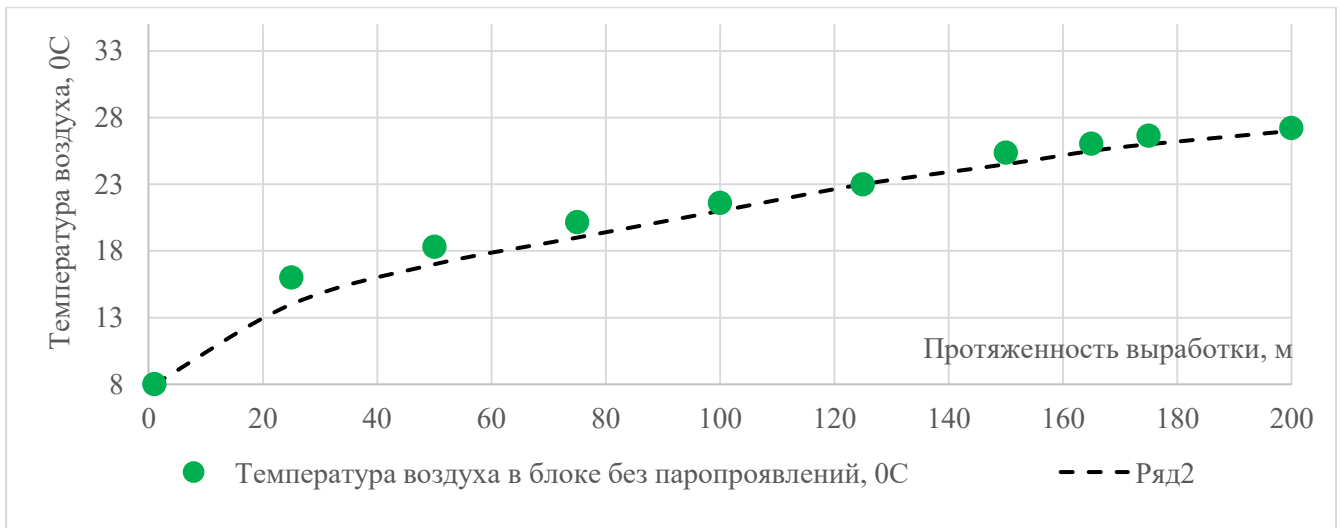


Рисунок 4.2 — Верификация методики расчёта для условий, характеризующихся наличием транспортируемой НСЖ

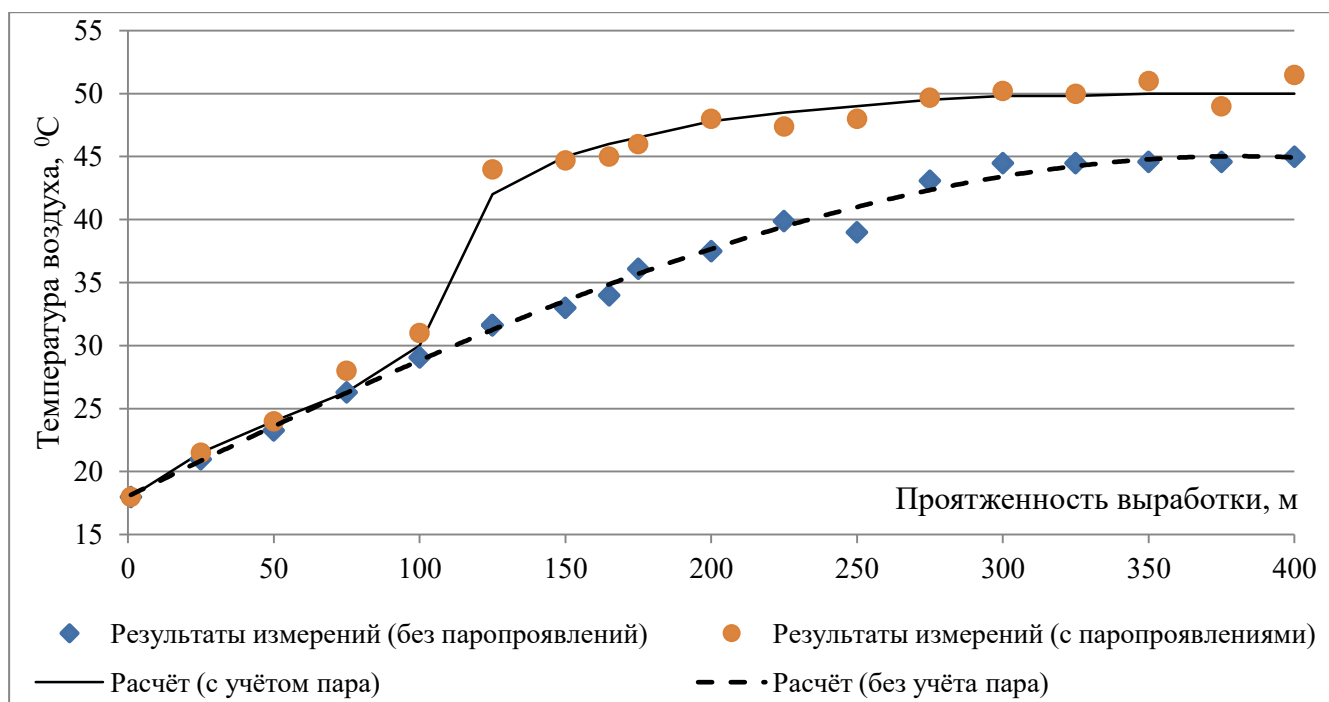


Рисунок 4.3 — Результаты верификации методики расчёта для условий, характеризующихся наличием паропроявлений, транспортируемой НСЖ и разогретым массивом

Из графиков на рисунке 4.2 и рисунке 4.3 наблюдается удовлетворительное совпадение результатов натуральных измерений и расчётных значений температуры воздуха в блоке, Разница между измеренными и расчетными значениями температуры не превышает $1,5^{\circ}\text{C}$ - 2°C , что свидетельствует о возможности применения предлагаемой методики для расчёта температуры воздуха в условиях нефтяных шахт.

Обязательным условием для гарантированной нормализации параметров микроклимата в выработках уклонного блока воздуха следует считать учет при выборе мероприятий по снижению температуры воздуха периодических поступлений пара в воздушную среду.

Разработанная методика использована далее для оценки эффективности мероприятий по регулированию теплового режима.

4.4 Оценка эффективности регулирования теплового режима горных выработок традиционными способами

Традиционно, способы управления тепловым режимом горных выработок принято разделять на горнотехнические и теплотехнические [11,40,122].

Горнотехнические способы направлены на минимизацию теплоступлений в шахтный воздух путем изменения технологических и технических параметров ведения работ:

- Оптимизация схемы вентиляции (подача большего количества воздуха, изменение сечений горных выработок, подсвежение воздушной струи, обособленное или секционное проветривание);

- Теплоизоляция нагретых поверхностей (теплоизоляция поверхности горных выработок, воздухопроводов, трубопроводов и иных «горячих» поверхностей [8,99];

- Технические способы, направленные на минимизацию теплоступлений от локальных источников теплоты в определенных условиях (орошение воздуха или полезного ископаемого водой, установка пароуловителей на скважинах, снижение интенсивности окислительных процессов);

Теплотехнические способы управления тепловым режимом горных выработок направлены на изменение термодинамических параметров воздуха (Влажность, температура) при помощи специализированного оборудования. Теплотехническое оборудование для охлаждения и кондиционирования воздуха можно разделить по расположению холодильной машины, воздухоохладителя. В зависимости от горнотехнических и горногеологических условий, возможно расположение холодильных машин и воздухоохладителей в различных вариациях как в горных выработках, так и на поверхности [23]. Для условий нефтяных шахт, применение теплотехнического оборудования затрудняется или является экономически неэффективным. Сложности в обеспечении теплоотведения в условиях высоких температур воздуха и массива, необходимость строительства ниш для расположения холодильного оборудования ставит под сомнение экономическую целесообразность использования теплотехнических устройств в

нефтяных шахтах. В исследовании рассмотрены горнотехнические способы управления тепловым режимом горных выработок [129,130].

4.4.1 Повышение расхода воздуха в выработках уклонного блока

Классическим способом обеспечения нормативных значений температуры воздуха в условиях подземных сооружений является подача свежего воздуха. В условиях нефтяных шахт, при поперечном сечении горных выработок уклонных блоков 8,5-14,0 м² и значительной удаленности большинства уклонных блоков от воздухоподающих стволов (более 1,5 км), подача большого количества воздуха к уклону затруднительна или невозможна [13,107]. Стоит отметить, что при такой удаленности, воздушная струя при подходе к уклонному блоку уже имеет температуру 16-20 °С.

Совместно с увеличением теплоаккумулирующих возможностей воздуха при подаче большего количества воздуха, увеличивается и скорость его движения по проветриваемой выработке. При увеличении скорости движения воздуха, увеличивается и коэффициент теплоотдачи от стенок выработок к воздуху, как следствие, при больших расходах, образуется большой тепловой поток.

Согласно результатам натурных исследований [15], количество воздуха, подаваемого к эксплуатационным галереям, составляет от 2,5 м³/с до 16 м³/с.

На рисунке 4.4 представлены результаты вариантных расчётов температуры воздуха для условий, характерных для блока («старого» типа), находящегося на 3 стадии разработки при различных расходах воздуха в выработке 8 м³/с, 16 м³/с и 20 м³/с.

Для оценки эффективности подачи большего количества воздуха (в пределах, реализуемых в условиях нефтяных шахт), по предложенной ранее методике, выполнены расчёты температуры воздуха по длине панели для условий блока «нового» типа, находящегося на 2 стадии разработки (в момент отсутствия паропроявлений), результаты расчёта представлены на рисунке 4.5.

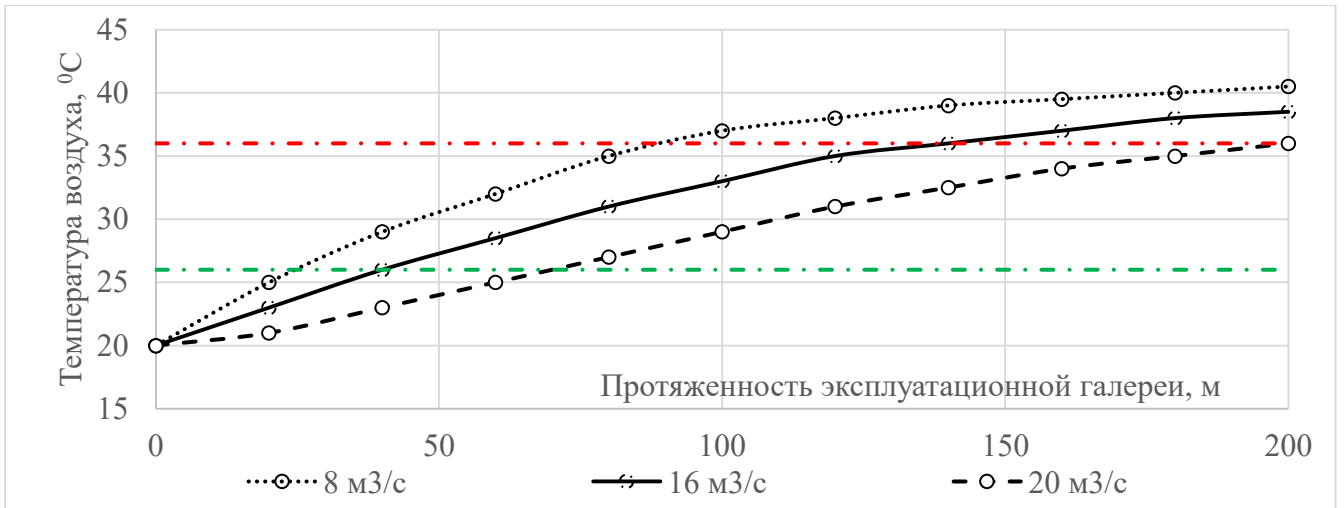


Рисунок 4.4 — Результаты расчёта температуры воздуха в буровой галерее для блока «старого» типа, находящегося на 3 стадии разработки при различных расходах воздуха

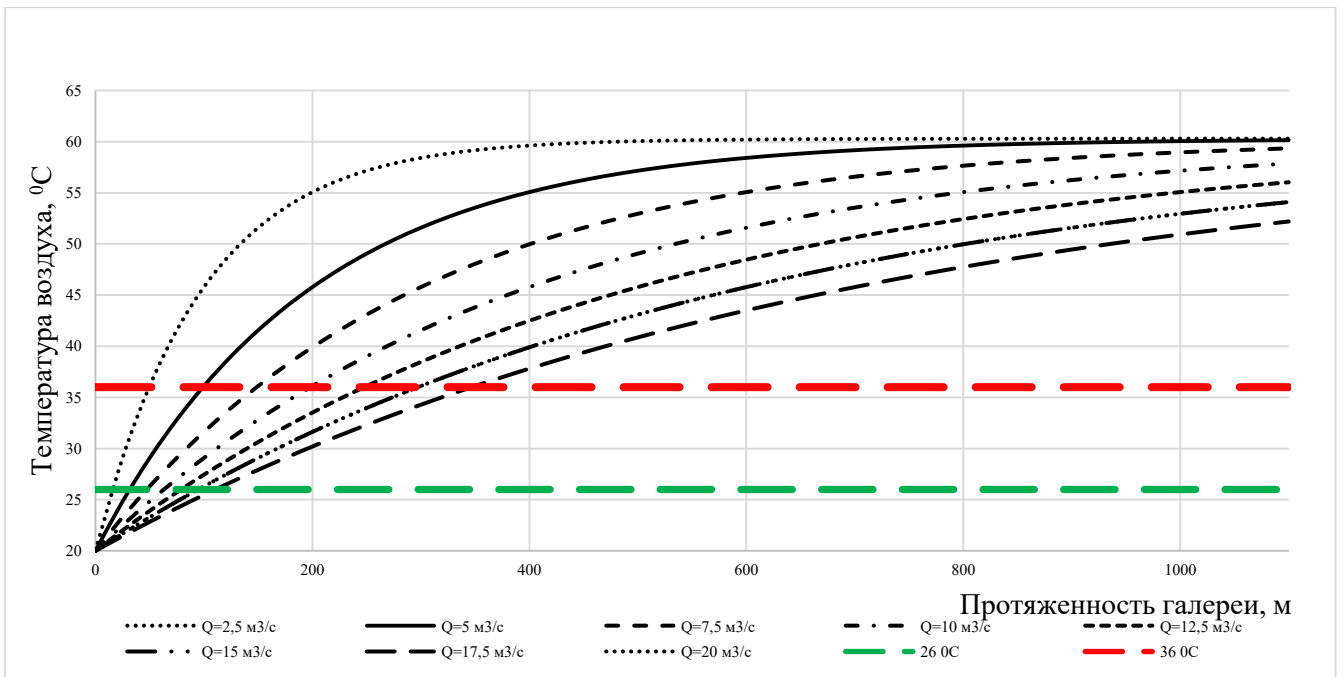


Рисунок 4.5 — Результаты расчёта температуры воздуха в буровой галерее для протяженного блока, находящегося на 2 стадии разработки при различных расходах воздуха

Из графиков видно, что уже при увеличении расходов воздуха в 2,5 раза (рисунок 4.4) и в 8 раз (рисунок 4.5) протяженность буровой галереи, в которой обеспечиваются нормативных значения температуры воздуха увеличивается на 130 м и на 200 м соответственно для условий, характерных блокам «старого» и «нового» типа. Для блоков большей протяженности (более 400 м.) увеличение

расхода воздуха не приводит к значительному эффекту по снижению температуры воздуха, что свидетельствует о необходимости дополнительных мероприятий по управлению тепловым режимом горных выработок.

4.4.2 Секционное проветривание уклонных блоков

Учитывая факт, что воздух, подаваемый на уклонный блок за счет общешахтной вентиляции при подходе к блоку, уже имеет значительную температуру (до 15-20 °С), существует способ проветривания, буровой галереи, организованный путем подачи свежего воздуха по вентиляционным скважинам с поверхности. В таком случае, происходит обособленное проветривания буровой галереи. Удаление нагретого воздуха также возможно по скважине, расположенной в конце проветриваемой выработки.

Для блоков «старого» выполнены расчёты требуемой температуры подаваемого воздуха, различных расходов для достижения температуры воздуха в буровой галерее, протяженностью до 200 м (рисунок 4.6)

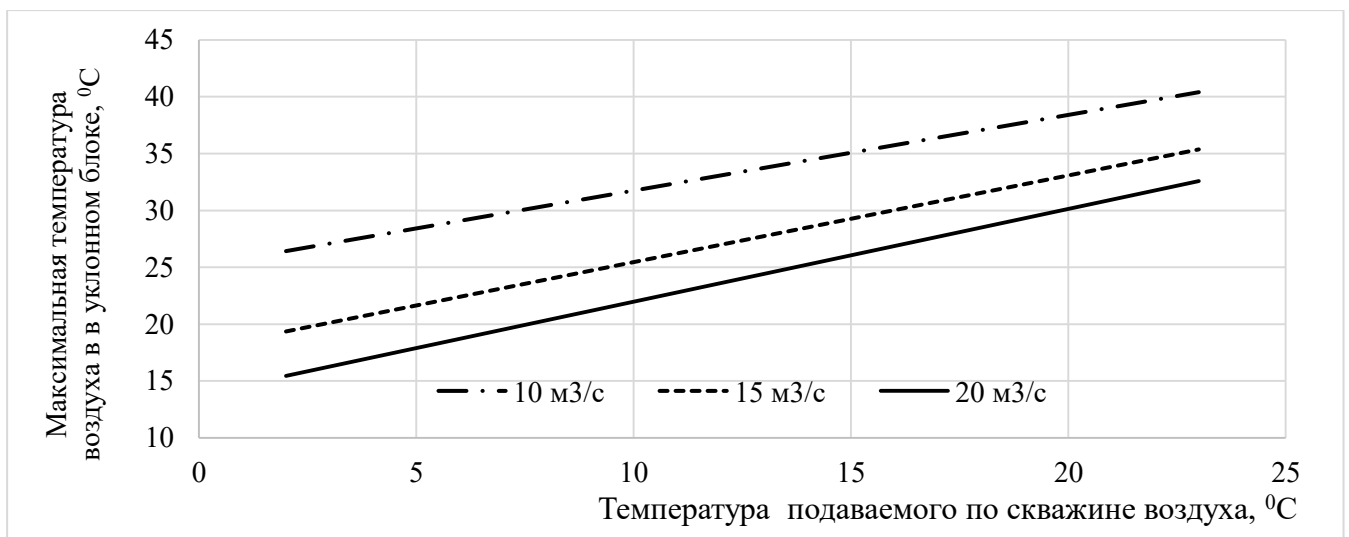


Рисунок 4.6 — Зависимость температуры в буровой галерее на расстоянии 200 м от ее начала от параметров, подаваемого в выработку воздуха

Для оценки эффективности данного способа проветривания для блоков, имеющих более протяженную буровую галерею, выполнены расчёты температуры воздуха по длине панели при подаче 20 м³/с воздуха, имеющего температуру от 2 °С до 25 °С. Результаты расчёта представлены на рисунке 4.7.

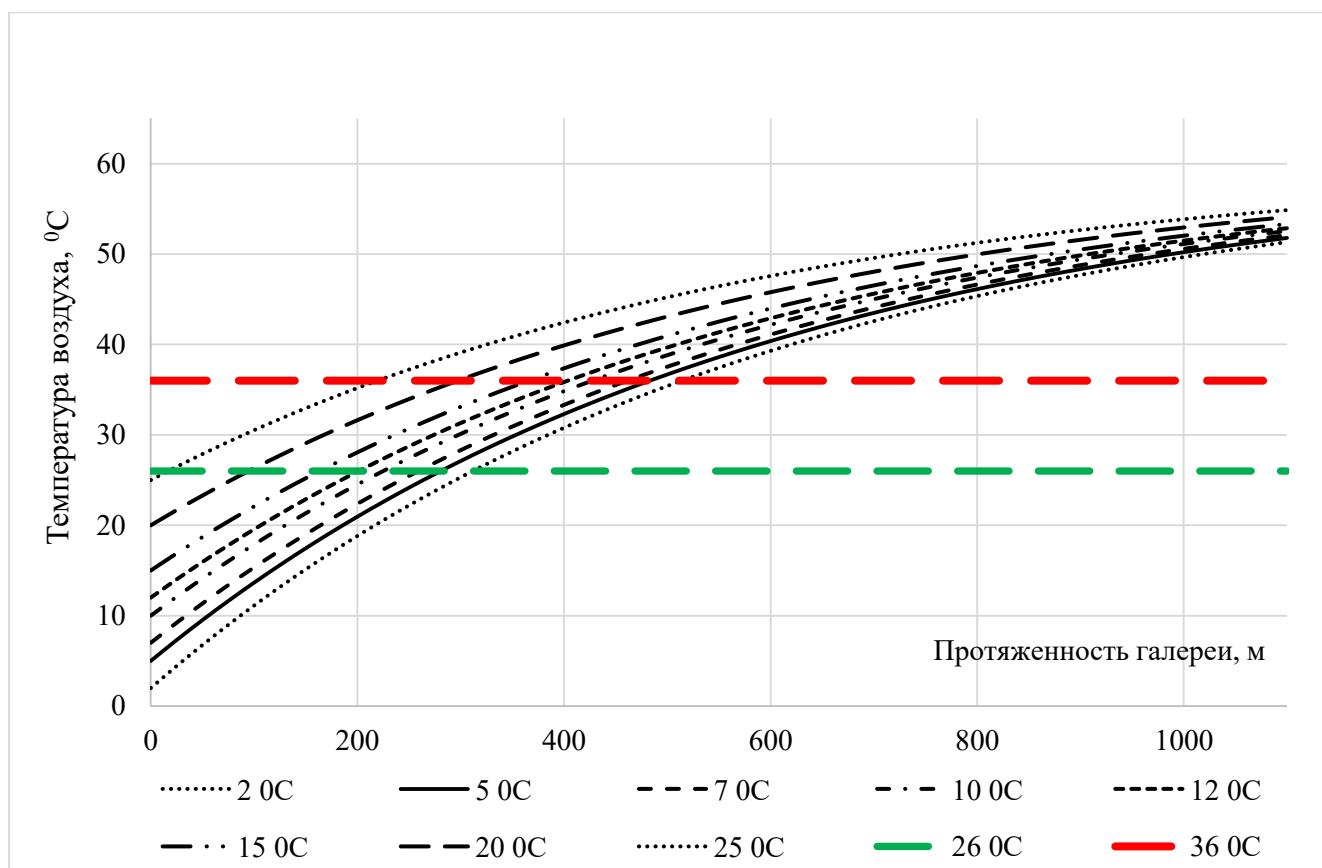


Рисунок 4.7 — Результаты расчёта температуры воздуха в буровой галерее при подаче 20 м³/с воздуха различной температуры

Из результатов расчёта, видно, что при подаче 20 м³/с воздуха температурой +2°C, максимально возможно обеспечить требуемую температуру воздуха в выработке протяженностью до 500 м. Для блоков «нового» типа, протяженностью панелей и буровых галерей более 600 м подача воздуха, имеющего более низкую температуру, чем шахтный воздух, а уклонный блок, в качестве альтернативы общешахтной вентиляции, для проветривания не является эффективным решением по обеспечению нормативных значений температуры воздуха на всей протяженности выработок.

4.4.3 Теплоизоляция стенок горных выработок

Мероприятия, направленные на уменьшение теплового потока от стенок горных выработок, путем их теплоизоляции испытывались в условиях нефтяных шахт. Теплоизоляционные свойства материалов определяются теплопроводностью и толщиной материала, в долгосрочной перспективе теплоизоляционные материалы теряют свои свойства, а дороговизна и сложность монтажа

теплоизоляционных покрытий ставят под сомнение экономическую эффективность от их использования [20,99]. Оценки эффективности теплоизоляционного покрытия выполнена для условий блоков «нового» типа, при подаче в блок $10 \text{ м}^3/\text{с}$ воздуха, температурой $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Результаты расчёта температуры воздуха при наличии и отсутствии теплоизоляционного покрытия в случае выхода пара и его отсутствия для блока, находящегося в условиях отсутствия поступлений пара (2 стадия разработки) и в условиях паропоступлений (3 стадия разработки), представлены на рисунке 4.8.

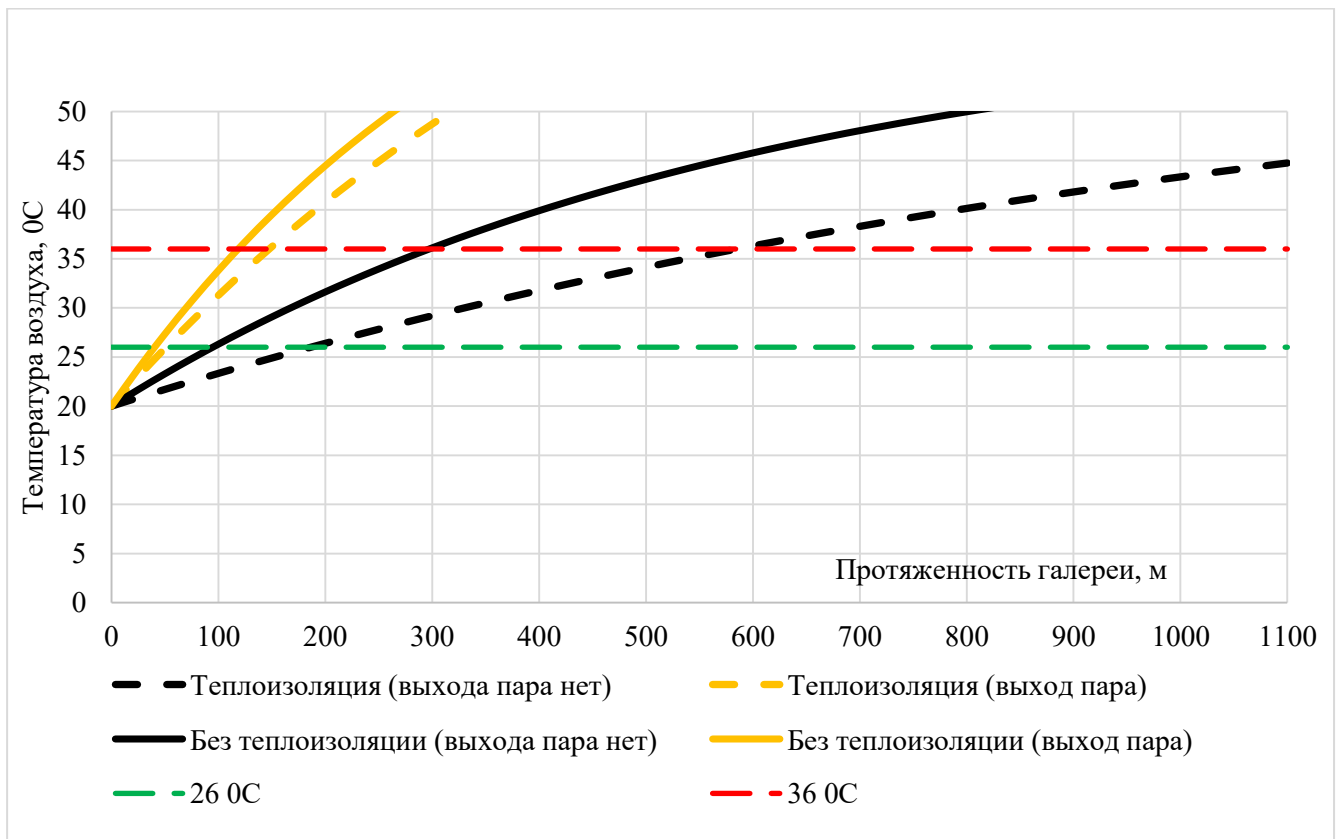


Рисунок 4.8 — Результаты расчёта температуры воздуха в буровой галерее при подаче $15 \text{ м}^3/\text{с}$ воздуха

Теплоизоляционное покрытие позволяет поддерживать температуру воздуха в нормативных пределах в блоках, в которых отсутствуют паропоступления на протяженности до 580 м, однако, при наличии паропоступлений зона снижается до 150 м.

4.5 Обеспечение нормативных значений температуры воздуха непосредственно в рабочей зоне

На основе выполненного анализа текущих горно-геологических условий и фактических термодинамических условий горных выработок уклонных блоков нефтяных шахт, представленных в главе 3 и оценки перспектив нормализации температуры воздуха при помощи горнотехнических способов управления тепловым режимом, представленных в главе 4.4, предлагается отойти от концепции охлаждения всей буровой галереи и перейти к обеспечению нормативных значений температуры воздуха непосредственно в рабочей зоне. Предложено устройство, позволяющее несложными манипуляциями изменить зону подачи свежего воздуха, что позволит обеспечить нормативные значения температуры воздуха во всех рабочих зонах, расположенных в проветриваемой выработке [16].

4.5.1 Описание устройства

Способ локального проветривания рабочей зоны является дополнением к секционному способу проветривания. На устье скважины, расположенном в кровле горной выработки у начала буровой галереи устанавливается камера смешения с шибером, при открытии которого, шахтный воздух может поступать в систему и смешиваться с воздухом из скважины. С другой стороны камеры смешения расположен вентилятор, нагнетающий воздух в воздуховод, расположенный в буровой галерее с определенной периодичностью на воздуховоде расположены U-образные воздушные каналы (ответвления). На воздуховоде установлена система шиберов, позволяющая обеспечить движение воздуха в необходимую рабочую зону [81]. Графическое изображение и схема устройства представлена на рисунке 4.9 и рисунке 4.10 соответственно.

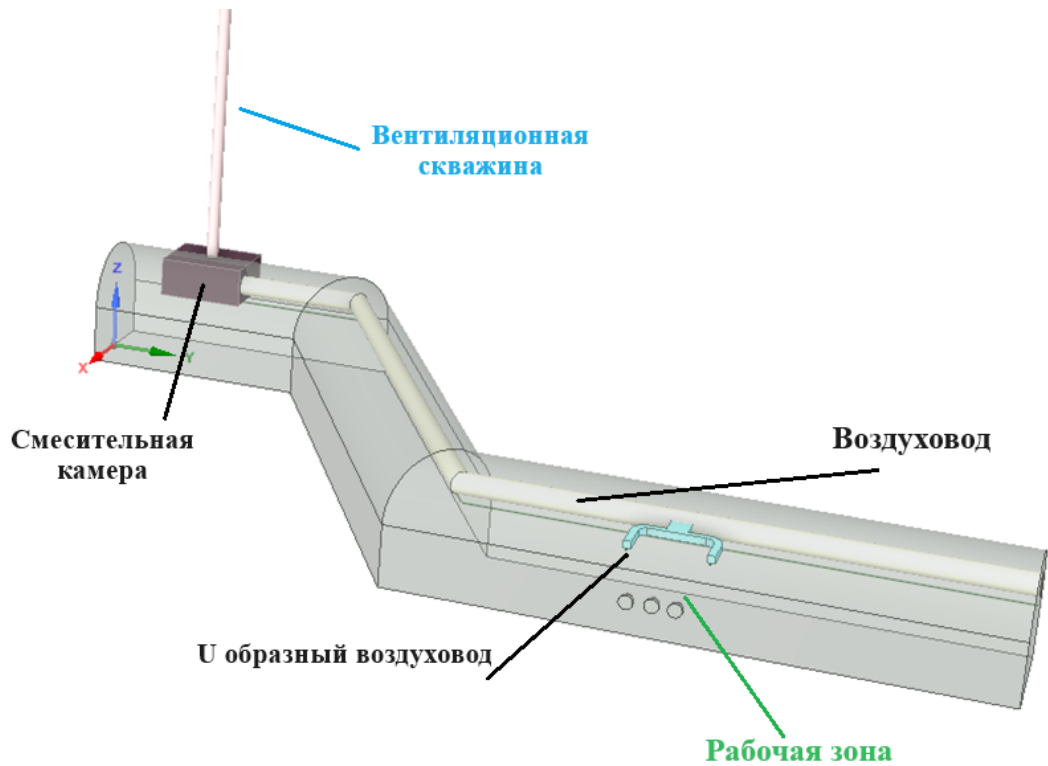


Рисунок 4.9 — Графическое изображение устройства для подачи воздуха в рабочую зону

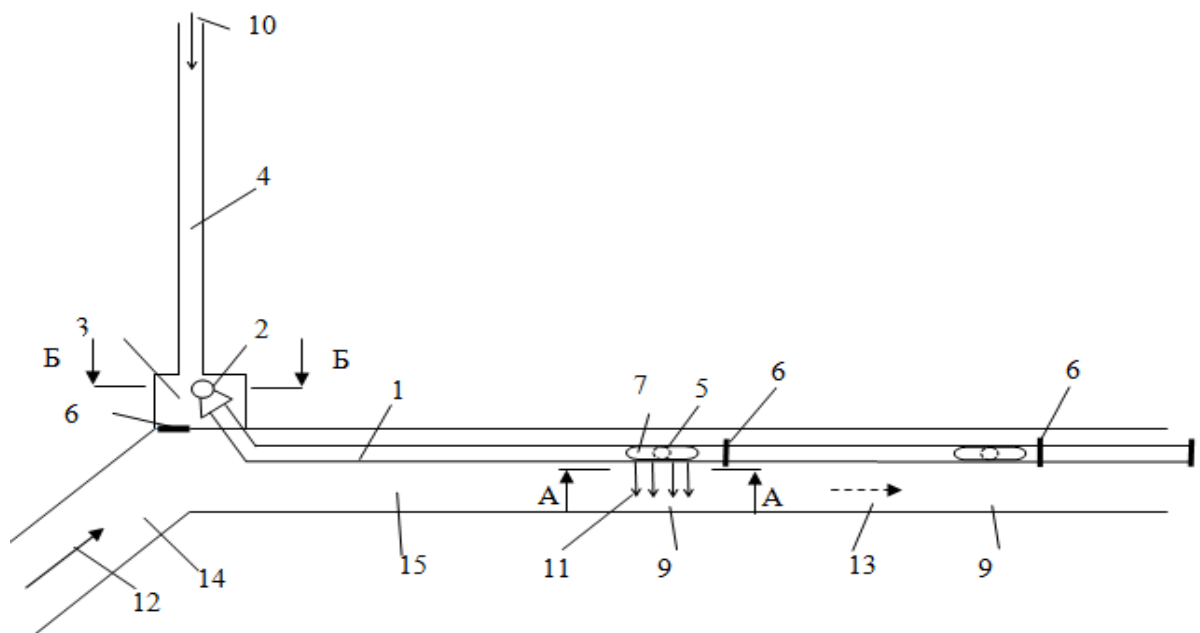


Рисунок 4.10 — Схема устройства для подачи воздуха в рабочую зону

1– магистральный воздуховод; 2– вентилятор; 3 – смесительная камера; 4 – скважина; 5 – патрубки на магистральном воздуховоде; 6– заслонки; 7–U образный воздуховод; 8 – отверстие для подачи воздуха из U образного воздуховода на рабочее место; 9– рабочие места в горной выработке выемочного участка; 10–

свежий воздух, поступающий с поверхности; 11 – воздух, подаваемый на рабочее место; 12 – воздух, поступающий по горной выработке; 13– исходящая воздушная струя; 14– выработка шахтной вентиляционной сети; 15– буровая галерея.

Для оценки эффективности обеспечения рабочей зоны нормативным значением температуры воздуха, необходимо выполнить моделирование воздухораспределения и теплораспределения в рабочей зоне и выполнить расчёт температуры воздуха в буровой галерее на участке, где осуществляется подача холодного воздуха в рабочую зону.

4.5.2 Моделирование воздухораспределения и теплораспределения при локальной подаче воздуха в рабочую зону

Для определения эффективности предлагаемого способа проветривания осуществлено моделирование движения и смешивания воздушных потоков (воздуха, поступающего из воздуховода и воздуха, движущегося по выработке). Моделирование выполнено в ПО Ansys CFX. Исходные данные для выполнения моделирования представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Исходные данные для моделирования распределения температуры воздуха в буровой галерее

Параметр	Значение	Единицы измерений
Площадь сечения выработки	10	м ²
Диаметр воздуховода	1	м
Температура поверхности пласта	80	°С
Температура поверхности почвы	40	°С
Температура поверхности кровли	50	°С
Температура поверхности «холодной» стенки	30	°С
Расход воздуха в выработке	5	м ³ /с
Расход воздуха в воздуховоде	10	м ³ /с

Продолжение таблицы 4.2

Параметр	Значение	Единицы измерений
Температура воздуха на входе на рассматриваемый участок	36	°С
Температура воздуха на выходе из воздуховода	15	°С
Давление	101,3	кПа

Исходные данные определены из условий одного из блоков, по которому задаются граничные условия в модели. Расчетной областью является участок горной выработки (буровой галереи) с площадью поперечного сечения 10 м², на кровле которой расположен воздуховод, диаметром 1 м.

Параметры расчётной сетки представлены в таблице 4.3, разбиение модели на конечные элементы представлено на рисунке 4.11

Таблица 4.3 — Исходные данные для моделирования распределения температуры воздуха в горных выработках нефтяных шахт

Параметр	Параметры расчётной конечно-элементной сетки
Количество элементов	5 204 471
Количество узлов	1 760 278
Тип элементов	Тетраэдры
Максимальный размер элемента на поверхности, м	0,1
Максимальный размер элемента для области в целом, м	0,3
Максимальный размер элементов на поверхности горной выработки (м)	0,03

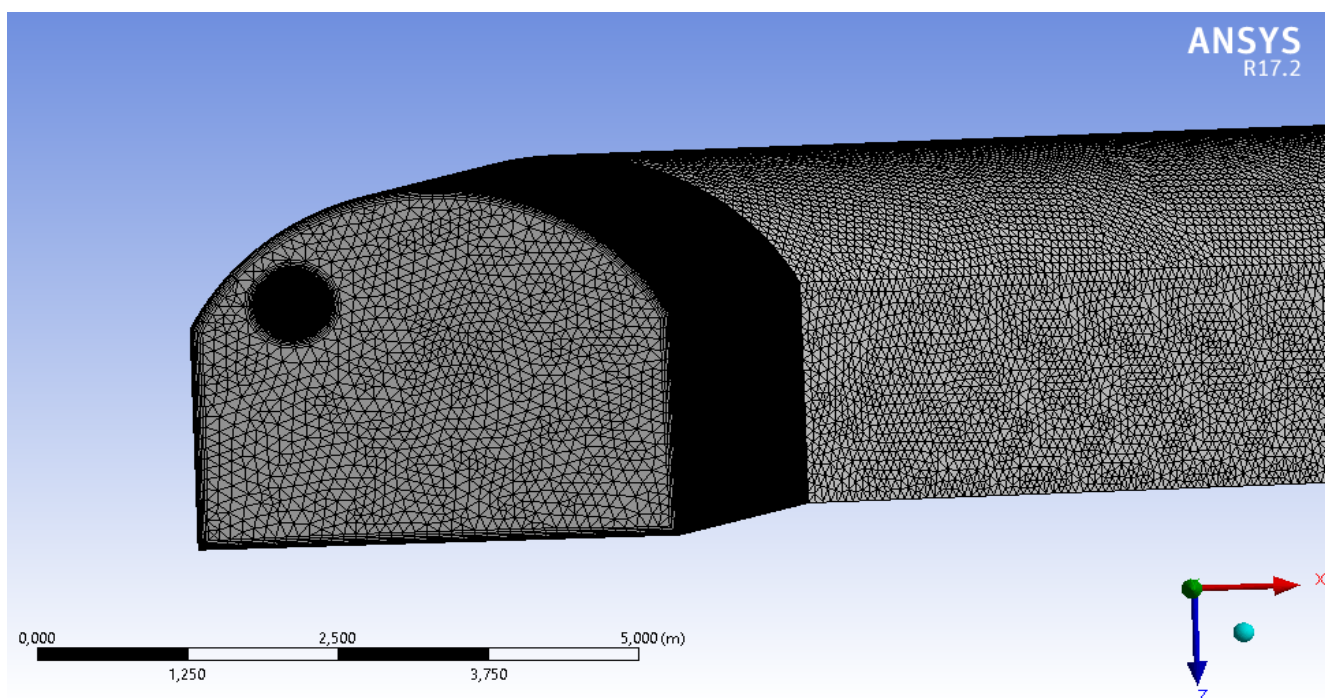


Рисунок 4.11 — Разбиение модели на конечные элементы
(конечно- элементная сетка)

В созданной математической модели решаются следующие уравнения:

1. Уравнения Навье-Стокса – движение воздуха;
2. Уравнение энергии (для термодинамической энтальпии h) – конвекция и теплопроводность в воздухе [128];
3. Уравнения k - ε модели турбулентности.

При моделировании движения воздуха в шахте предполагается использование турбулентного потока, который описывается моделью k - ε турбулентности. Коэффициент турбулентной вязкости μ_t определяется через кинетическую энергию турбулентности согласно формуле Колмогорова-Прандтля (формула 4.16) [27,53,56]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.16)$$

Система уравнений для k - ε модели турбулентности формируется с помощью дополнительных уравнений для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε . Уравнение переноса турбулентной кинетической энергии получено из уравнений Навье-Стокса и имеет вид [27,53,57.113]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon \quad (4.17)$$

Уравнение переноса скорости диссипации турбулентной кинетической энергии принимает следующий вид:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V \varepsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.18)$$

Уравнение переноса энтальпии используется в форме:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho V h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q, \quad (4.19)$$

h – энтальпия, Дж; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ∇ – градиент функции; V – вектор относительной скорости, м/с; Pr – число Прандтля; μ – молекулярная динамическая вязкость, кг/(м·с); μ_t – турбулентная динамическая вязкость, кг/(м·с); ρ – плотность, кг/м³; λ – молекулярная теплопроводность, Вт/(м·К).

При моделировании в программном комплексе Ansys CFX, не учитывается теплообмен между воздуховодом и рудничным воздухом, а принимается допущение, что температура воздуха, подаваемого из воздуховода в рабочую зону, составляет +20 °С. Возможность подачи воздуха с такой температурой достигается путём подачи воздуха с поверхности холодного в зимний период или охлажденного при помощи холодильной машины в тёплый период и теплоизоляцией воздуховода.

На рисунке 4.12 представлено распределение скоростей воздушных потоков для определения зоны возмущений (или завихрений) воздушного потока.

Установлено, что зоны возмущения ярко выражены за 5 м. до рабочей зоны и через 10 м. после рабочей зоны по пути движения воздушной струи по проветриваемой выработке.

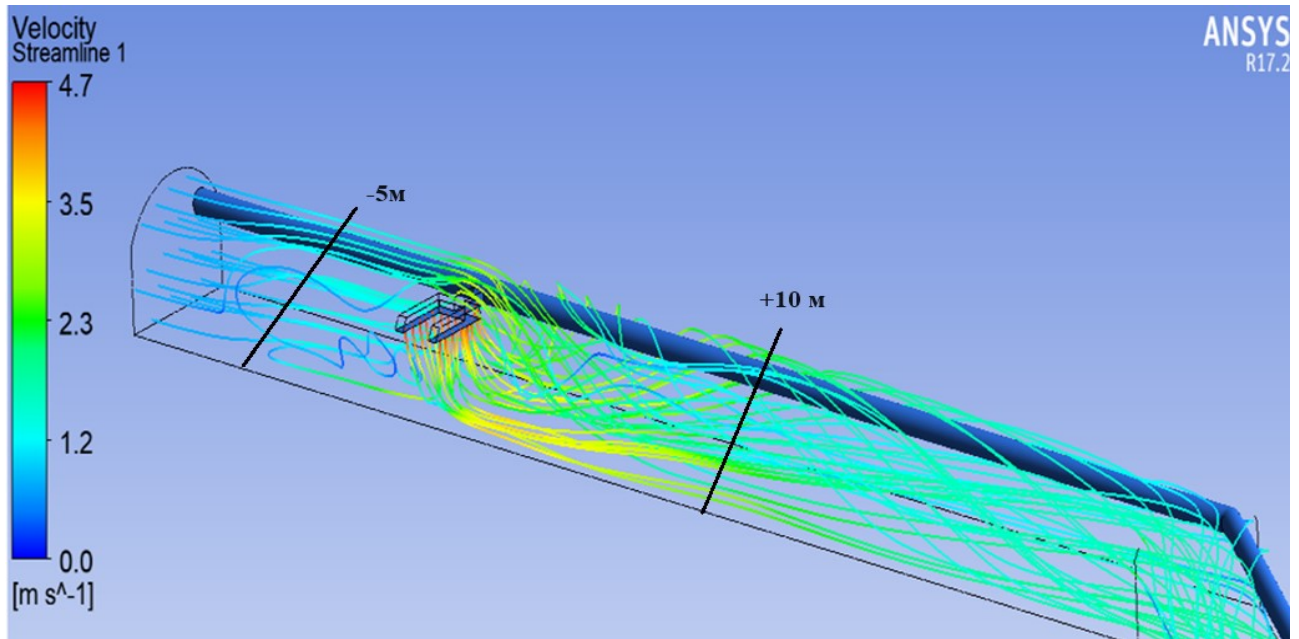


Рисунок 4.12 — Распределение скоростей воздушных потоков в расчетной модели

На рисунке 4.13 представлены результаты моделирования теплораспределения в буровой галерее при

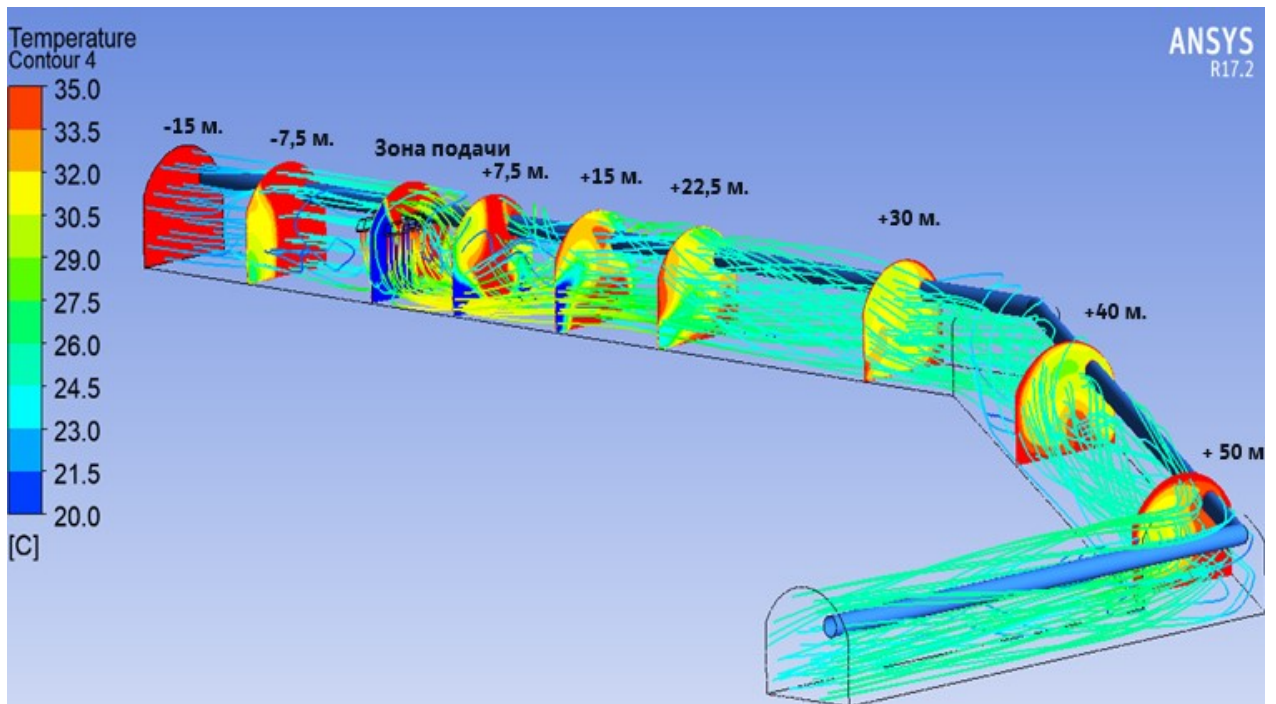


Рисунок 4.13 — Распределение температур воздуха в буровой галерее при локальном проветривании рабочей зоны

Для наглядного отображения и анализа результатов, на рисунке 4.14 и рисунке 4.15 отражены разрезы по сечению горной выработки, отражающие температуру воздуха на разном удалении от места подачи (от -7,5 м до +50 м).

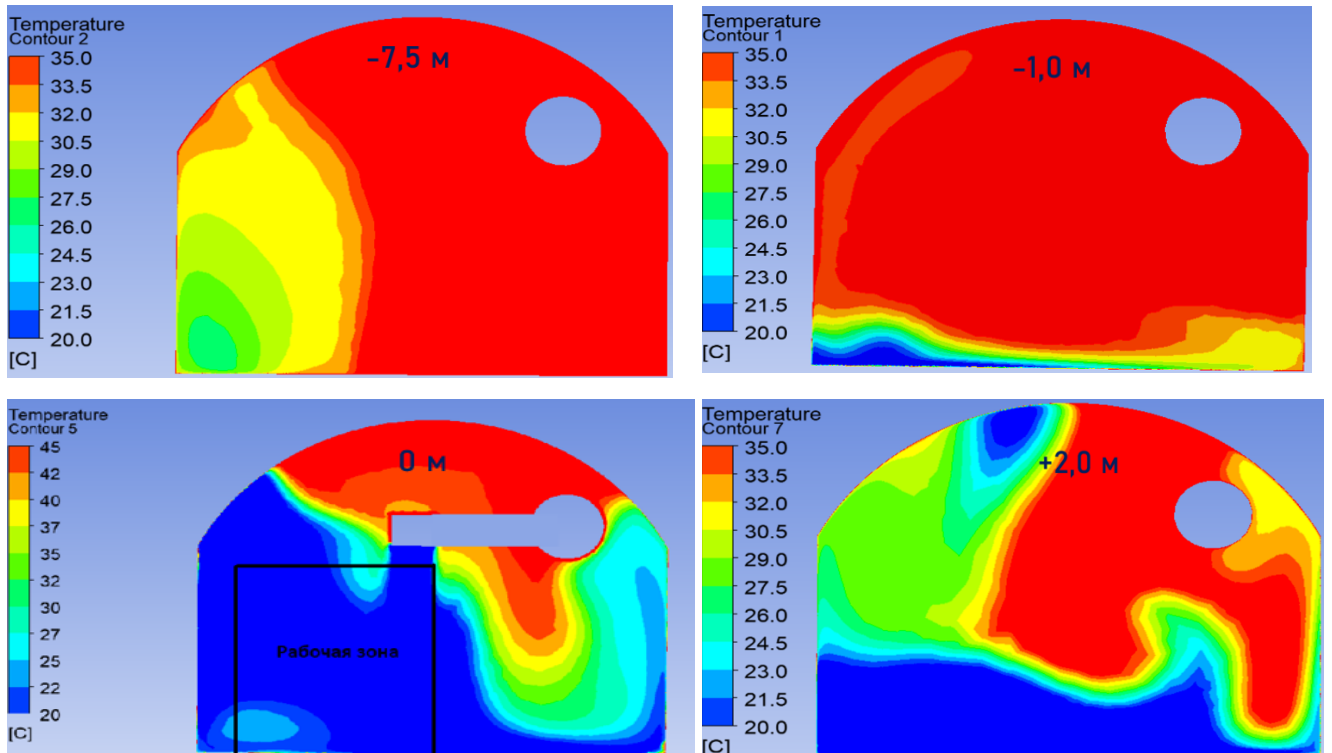


Рисунок 4.14 — Распределение температур воздуха по сечению горной выработки в сечениях (-7,5 м, -1 м, 0 м, +2 м от места подачи воздуха)

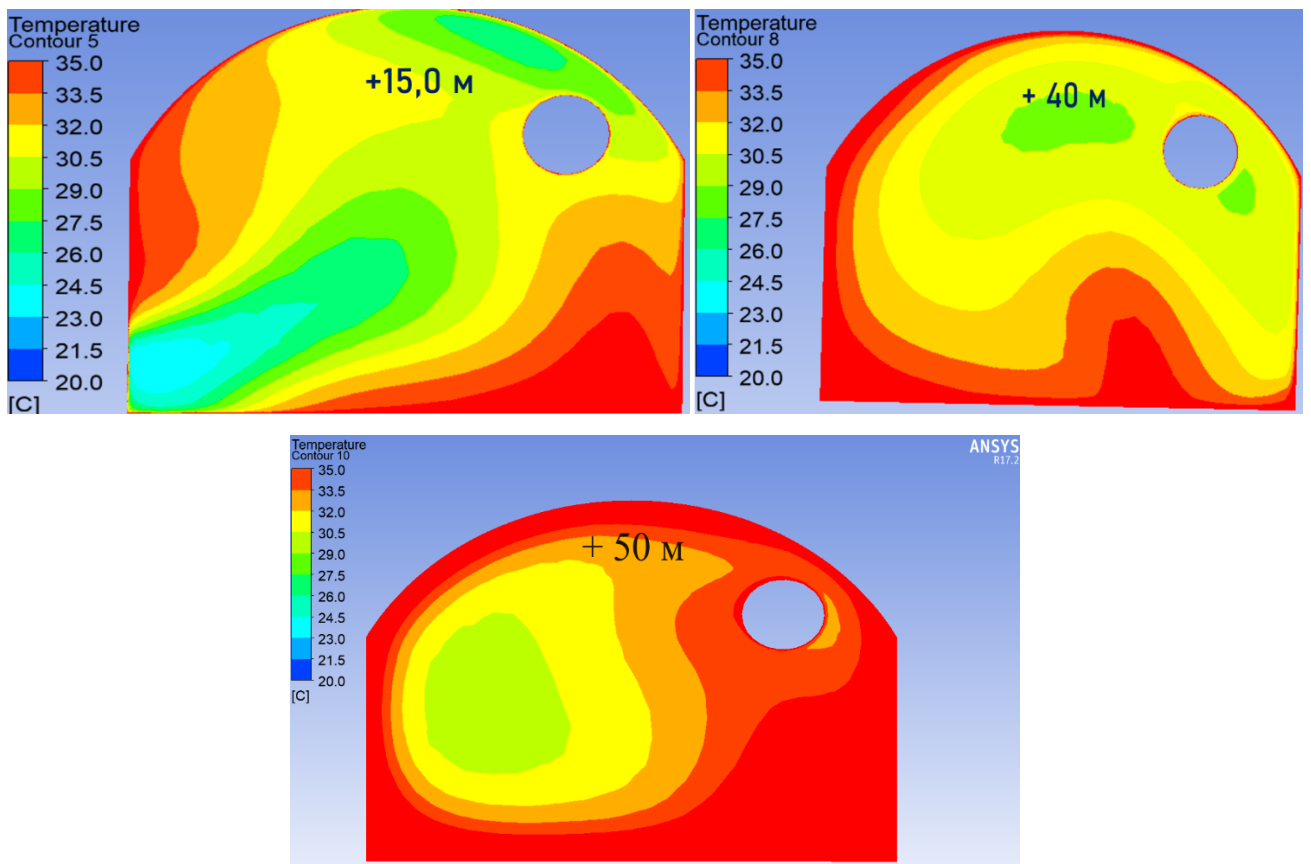


Рисунок 4.15 — Распределение температур воздуха по сечению горной выработки в сечениях (+15 м, +40 м, +50 м от места подачи)

На основе полученных распределений температуры воздуха (рисунок 4.14 и рисунок 4.15) определены средние значения температуры воздуха по сечению буровой галереи и температура воздуха в рабочей зоне в координатах, относительно места подачи воздуха на рабочую зону (рисунок 4.16).

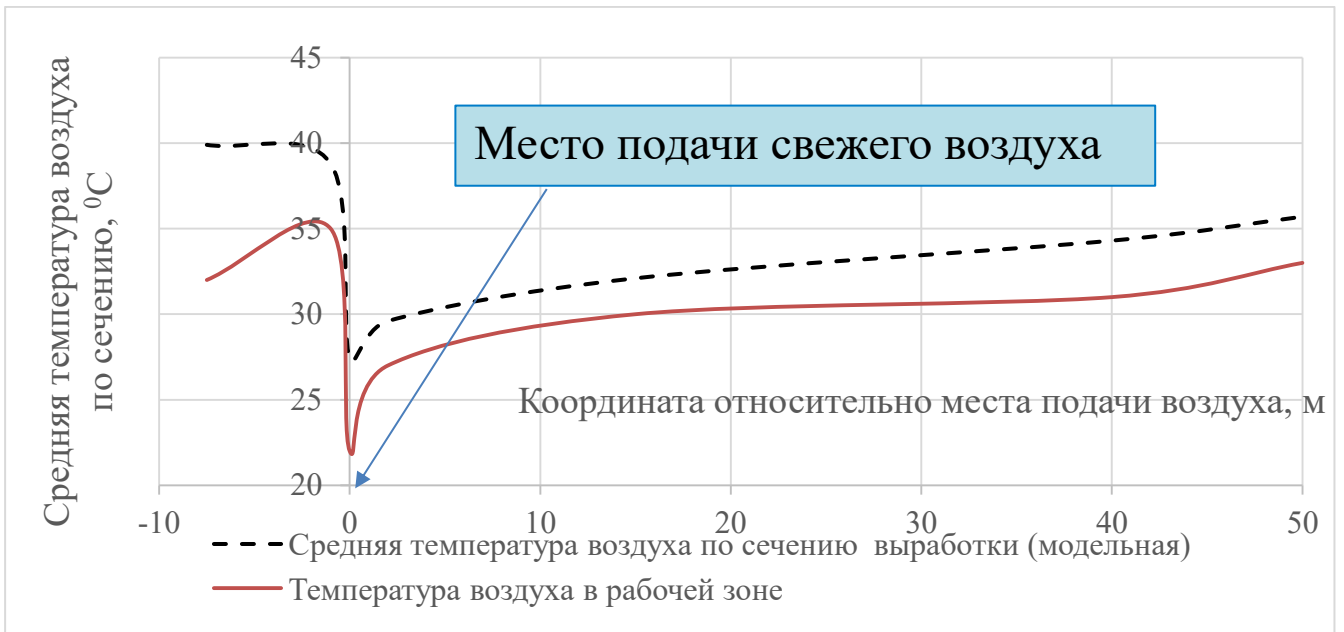


Рисунок 4.16 — Распределение средней температуры воздуха и температуры воздуха в рабочей зоне по длине выработки относительно места его подачи

Результаты моделирования подтверждаются результатами расчёта температуры воздуха при условии подачи более холодного воздуха в рабочую зону (рисунок 4.17).

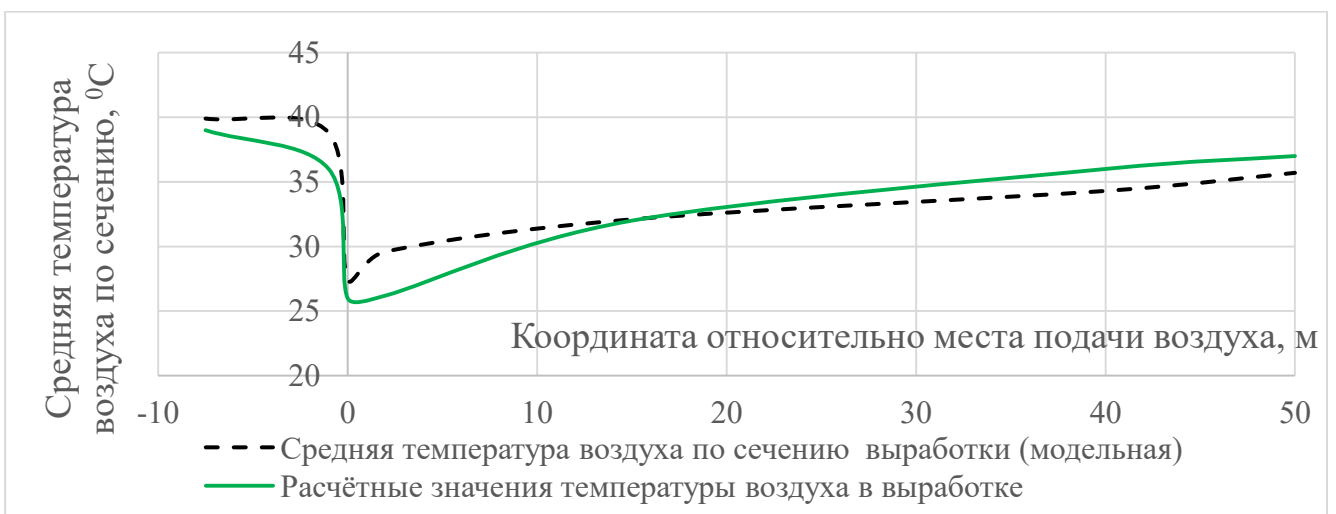


Рисунок 4.17 — Распределение средней температуры воздуха по длине выработки относительно места подачи

Результаты моделирования воздухораспределения и теплораспределения в буровой галерее свидетельствуют о возможности применения предложенного способа обеспечения рабочих зон нормативным значением температуры воздуха на участке до 40 м от места подачи свежего воздуха в выработку.

4.6 Выводы по главе 4

1) Разработанная методика расчёта температуры воздуха для выработок уклонного блока нефтяных шахт даёт возможность учёта неоднородности температурного поля в массиве, окружающего горные выработки, теплообмена воздуха с транспортируемой нефтесодержащей жидкостью и поступающего пара;

2) Результаты прогнозных расчётов, выполненные по разработанной методике, показали невозможность обеспечения нормативных параметров воздуха при протяженности уклонных блоков, превышающих 600 м, что определяет необходимость применения инновационных методов регулирования теплового режима горных выработок;

3) Предложенный инновационный способ регулирования теплового режима основан на обеспечении требуемой температуры воздуха в рабочих зонах, распределенных по длине выработки и может быть реализован с помощью подачи воздуха, имеющего более низкую температуру, чем температура воздуха в выработке непосредственно в рабочую зону;

4) Эффективность предлагаемого способа подтверждена результатами математического моделирования скоростных и температурных полей, формирующихся в воздушной среде перед и после места подачи воздуха в рабочую зону на основе ПО Ansys.

5) Сопоставление результатов математического моделирования распределения температур воздушной среды с расчётом средней по сечению выработки температуры воздуха, который выполнен по предложенной методике свидетельствует об адекватности предлагаемого инновационного подхода по регулированию теплового режима горных выработок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проанализированы закономерности формирования теплового режима горных выработок уклонных блоков в условиях нефтяных шахт. На основе полученных закономерностей формирования теплового режима, определяемых стадией разработки уклонного блока определена структура теплового баланса горных выработок. На основе экспериментальных и теоретических исследований, выполнено математическое моделирование процессов тепломассопереноса в условиях горных выработок, позволяющая осуществлять оценку эффективности различных способов управления тепловым режимом. На основе вариантных расчётов, определена эффективность горнотехнических способов управления тепловым режимом горных выработок для условий буровых галерей уклонных блоков. Предложен новый способ, позволяющий обеспечить рабочие зоны буровых галерей нормативным значением температуры воздуха.

По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. В условиях добычи нефти термощахтным способом на тепловой режим горных выработок оказывают влияние следующие факторы: горнотехнические параметры уклонного блока, способ закачки пара, способ транспортировки НСЖ, время эксплуатации блока и т.д.

2. Управление тепловым режимом горных выработок уклонных блоков, должно осуществляться с учетом стадии разработки блока после предварительного ранжирования источников теплоты, определяющих термодинамические параметры воздуха.

3. Структура теплового баланса выработок уклонного блока изменяется по мере его отработки. На первой стадии преобладают тепловыделения от транспортируемой НСЖ, на второй – тепловыделения от НСЖ и от неоднородного горного массива, окружающего выработок, на третьей стадии структура теплового баланса существенно изменяется в периоды поступления в рудничную атмосферу из трещин в нефтяном пласте пара.

4. Для тепловых расчетов выработок нефтяных шахт может быть использован квазистационарный вариант уравнения теплового баланса, в котором учтены процессы теплообмена рудничного воздуха с неоднородным горным массивом, окружающим выработки, с нефтесодержащей жидкостью в лотках и тепловой эффект поступающего из нефтяного пласта пара, при допущении о линейном характере изменения относительной влажности по длине выработок и возможности аппроксимации влагосодержания насыщенного пара с заданных интервалах температур линейными зависимостями.

5. В периоды поступления пара из нефтяного пласта традиционные мероприятия по нормализации теплового режима (увеличение количества воздуха, теплоизоляция поверхности нефтяного пласта и лотков для транспортировки нефтесодержащей жидкости) адиабатическое увлажнение воздуха) не приводят к положительному результату. В этой связи рациональным следует считать переход от концепции снижения температуры воздуха по всей длине выработок к локальному обеспечению регламентируемых параметров воздуха в рабочих зонах, перемещающихся по длине выработки по необходимости выполнения технологических операций.

6. Одна из возможностей организации локального снижения температуры воздуха в рабочих зонах может быть реализована на основе адресной подачи воздуха, имеющего более низкую температуру, чем температуры воздуха в выработке, по воздуховоду, проложенному по длине выработки и патрубками для подачи воздуха непосредственно на участки, где находятся горнорабочие.

7. Эффективность использования предложенного способа локального регулирования теплового режима подтверждена математическим моделированием на основе программного пакета Ansys CFX, результаты которого свидетельствуют о том, что при подаче свежего воздуха в рабочую зону, температура воздуха в выработке снижается до допустимой на участке за 2 м до рабочей зоны и до 40 м после места поступления свежего воздуха в выработку.

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение натурных исследований теплового режима подземных сооружений в условиях геотермальной активности, выявление закономерностей формирования теплового режима горных выработок для условий естественных и искусственных термических аномалий, моделирование воздухораспределения и теплораспределения в проветриваемых выработках при применении предложенного в диссертационной работе способа локальной подачи воздуха для условий выработок, протяженностью более 600 м, находящихся в зонах термических аномалий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабьев, В. Р. Нормализация теплового режима протяженных тупиковых выработок при высоких температурах пород на основе шахтных передвижных кондиционеров / В. Р. Алабьев, В. В. Новиков, Л. А. Пашинян, Т. П. Бажина // Записки Горного института.- 2019. - № 237. - С. 251-258.
2. Аметов, И. М. Добыча тяжелых и высоковязких нефтей / И.М. Ахметов, Ю.Н. Байдинов, Л.М. Рузин, Ю.А. Спиридонов //М.: Недра. – 1985. – Т. 205.
3. Анализ эффективности работы нового способа проветривания уклонного блока нефтяной шахты / А. В. Николаев, П. В. Максимов, Г. З. Файнбург, Д. А. Конотоп // Горный информационно-аналитический бюллетень - 2023. - № 5. - С. 83-98.
4. Андрющенко, В. Н. Исследование влияния микроклимата на производительность труда рабочих угольных шахт. - М.: Изд. ВНИЭИуголь, 1972. - 27 с.
5. Андрющенко, В.Н. Климатические условия труда в глубоких шахтах / В.Н. Андрющенко, Ю.Д. Дядкин, Е.П. Захаров. - М.: Изд.ЦНИЭИуголь, 1974. - 36 с.
6. Андрющенко, В.Н. Проблемы регламентации микроклимата подземных выработок / В. Н. Андрющенко. - Физические процессы горного производства, вып. 11. Л.: Изд.ЛГИ. - С. 26-37.
7. Антониади, Д. Г. Научные основы разработки нефтяных месторождений термическими методами – М.: Недра, 1995. – 264 с.
8. Божилов, В. Тепло- и гидроизоляция – эффективное средство улучшения микроклимата в рудниках / В. Божилов, К. Петров // Доклады 9-й сессии Международного бюро по горной теплофизике. - Польша: Гливице, 2000 – С. 245-255.
9. Воропаев, А.Ф. Регулирование теплового режима в призабойном пространстве тупиковых выработок воздушными кондиционерами / А.Ф.

Воропаев, Б.Д. Чижов, Ю.А. Новосельский. - К.: Наукова думка. Горная теплофизика, 1968. - С.52-68.

10. Воропаев, А.Ф. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха в глубоких шахтах. М.: Недра, 1979. - 192 с.

11. Галкин, А. Ф. Горнотехнические системы регулирования теплового режима / А.Ф. Галкин // Горная промышленность. – 2008. – №. 3. – С. 14-17.

12. Галкин, А.Ф. Термоаккумулирующие выработки / А.Ф. Галкин, Ю.А. Хохлов. - Новосибирск: Наука, 1992. - 130 с.

13. Гендлер, С. Г. Особенности формирования термодинамических параметров воздушной среды при добыче нефти термошахтным способом / С. Г. Гендлер, **И. Р. Фазылов** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 1. – С. 76-91.

14. Гендлер, С. Г. Оценка эффективности использования закрытой системы сбора нефти для нормализации микроклимата в эксплуатационных галереях нефтяных шахт / С. Г. Гендлер, **И. Р. Фазылов** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 65-78.

15. Гендлер, С. Г. Результаты экспериментальных исследований теплового режима нефтяных шахт при термическом способе добычи нефти / С. Г. Гендлер, **И. Р. Фазылов**, А. Н. Абашин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 6-1. – С. 248-262.

16. Гендлер, С. Г. Теплофизическое обоснование инновационного способа нормализации микроклимата в рабочих зонах эксплуатационных галерей нефтяных шахт / С. Г. Гендлер, **И. Р. Фазылов** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 4. – С. 608-620.

17. Гендлер, С.Г. Исследование теплового режима очистных выработок глубоких рудников Октябрьского месторождения при системах разработки с твердеющей закладкой: автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук / Гендлер Семен Григорьевич. - Ленинград, 1976. — 20 с.

18. Гендлер, С.Г. Особенности тепловых расчетов горных выработок при системах разработки с твердеющей закладкой / С.Г. Гендлер // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 1981. - №11. - С. 19.

19. Гендлер, С.Г. Тепловой режим подземных сооружений. — Л.: ЛГИ им. Г.В. Плеханова, 1987. — 102 с.

20. Гендлер, С.Г. Управление тепловым режимом подземных сооружений глубокого заложения при переменных аэротермодинамических параметрах воздушного потока: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Гендлер Семен Григорьевич. — Санкт-Петербург, 1996. — 43 с.

21. Герасимов, И.В. Большое будущее Яреги. О комплексном развитии Ярегского нефтетитанового месторождения / И.В. Герасимов // Регион. – 2012. – № 9. – С. 7-10

22. Гуляев, В.Э. Анализ технологических показателей систем термошахтной разработки Ярегского нефтяного месторождения / В.Э. Гуляев, Ю.П. Коноплев, И.В. Герасимов // Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: материалы межрегиональной научно-технической конференции. – Ухта: УГТУ, 2011. - С. 1218

23. Гусев, В.С. Методы теплотехнических расчетов по обеспечению микроклимата в сооружениях гражданской обороны. М.: Стройиздат, 1975. - 157 с.

24. Данилова, Е. Тяжёлые нефти России. Российская Федерация стоит на пороге масштабного расширения добычи природных битумов и внедрения отечественных разработок / Е. Данилова // Сырье. – 2008.– С. 34-37.

25. Дмитриев, А. П. Термодинамические процессы в горных породах / А.П. Дмитриев, Л.С. Кузьяев. – М.: – 1967. - 159 с.

26. Дуркин, С. М. Новые термошахтные технологии и оценка их эффективности путём численного моделирования / С.М. Дуркин, О.А. Морозюк, Л.М. Рузин // Нефть.Газ. Новации. – 2013. – № 4. – С. 45-51.

27. Дуркин, С.М. Вопросы прогнозирования параметров нагревающего микроклимата в горных выработках нефтешахт с применением средств математического моделирования / С.М. Дуркин, М.Л. Рудаков, Е.Г. Булдакова, М.А. Коробицына // Промышленная безопасность предприятий минеральносырьевого комплекса в XXI веке: Материалы IV Международной научнопрактической конференции.– СПб, 2018.– С. 33.

28. Дуркин, С.М. Использование численного моделирования при прогнозировании технологических показателей разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами / С.М. Дуркин, И.Н. Меньшикова, А.А. Терентьев // Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение: Материалы науч.-практ. конф. – Москва, 2017. – С. 149-153.

29. Дуркин, С.М. Математическая модель скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дуркин Сергей Михайлович. – Ухта, 2014. – 151 с.

30. Дуркин, С.М. Моделирование процесса разработки нефтяных месторождений (теория и практика): учеб. пособие. – Ухта: УГТУ, 2014. – 104 с.

31. Дуркин, С.М. Применение численного моделирования при прогнозировании технологических показателей разработки шахтного блока Ярегского месторождения / С.М. Дуркин, И.Н. Меньшикова, О.А. Морозюк, Л.М. Рузин // Технологии нефти и газа. – 2016. – № 5 (106). – С. 43-46

32. Дядькин, Ю.Д. Борьба с высокими температурами в глубоких шахтах и рудниках. — М.: Углетехиздат, 1957. — 80 с.

33. Дядькин, Ю.Д. Методика теплового расчета шахт и рудников в сложных условиях. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых / Ю.Д. Дядькин // Новосибирск, Наука. - №5. - 1973. - С.92-100.

34. Дядькин, Ю.Д. О методах тепловых расчетов рудничного воздуха. Научные доклады высшей школы. «Горное дело». - 1958. - №1.

35. Дядькин, Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. — М.: Недра, 1968. — 256 с.

36. Зайцев, А.В. Исследование критериев нормирования микроклиматических условий в горных выработках / А.В. Зайцев, М.А. Семин, Ю.А. Клюкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 12. – С. 151-156.

37. Зайцев, А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Зайцев Артём Валерьевич. — Пермь, 2019. - 247 с.

38. Зайцев, А.В. Теплотехнические системы нормализации микроклиматических параметров воздуха в глубоких рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» / А.В. Зайцев, Л.Ю. Левин, С.В. Бутаков, М.А. Семин // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 34-39.

39. Извлечение природных битумов, сверхтяжелых нефтей и их переработка в синтетическую нефть. Современные технологии, технико-инвестиционные показатели установок и перспективные направления развития на мировом рынке: отчет-справочник / ООО "Прима - Химмаш"; рук. работы А.Х. Сафин. – Санкт-Петербург, 2012. – 235 с.

40. Исаевич, А.Г. Регулирование теплового режима атмосферы рабочих зон при термошахтной отработке пластов неглубокого залегания / А.Г. Исаевич, Н.А. Трушкова, А.В. Шалимов // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2012. – № 5. – С. 10-14.

41. Казаков, Б.П. Влияние процессов испарения и конденсации влаги на тепловой режим глубоких рудников / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Горный журнал. – 2016. – № 3. – С. 73-76.

42. Казаков, Б.П. Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Записки Горного института. — СанктПетербург, 2017. — Т. 223. — С. 116-124.

43. Казаков, Б.П. Формирование и нормализация микроклимата подземных рудников при разработке месторождений калийных солей: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Казаков Борис Петрович. - Пермь, 2001. - 47 с.

44. Казаков, Б.П. Формирование микроклиматических параметров атмосферы в воздухоподающих стволах и главных выработках глубоких рудников / Казаков Б.П., Зайцев А.В., Семин М.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. - №8. — С. 167-171.

45. Калинина, А. А. Геолого-экономическая оценка комплексного использования Ярегской тяжелой нефти / А.А. Калинина, Е.П. Калинина // Известия Коми научного центра УрО РАН. — 2013. — Вып. 3(15). — С. 110-117.

46. Клюкин, Ю.А. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в уклонных блоках нефтяных шахт // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 305-310.

47. Клюкин, Ю.А. Разработка методики проектирования систем кондиционирования воздуха протяженных буровых галерей нефтешахт // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 278-280.

48. Клюкин, Ю.А. Разработка систем кондиционирования воздуха протяженных рабочих зон в условиях неблагоприятного теплового режима

нефтешахт // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 12 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 290-292.

49. Клюкин, Ю.А. Разработка системы нормирования микроклиматических условий в подземных рабочих зонах // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 270-272.

50. Клюкин, Ю.А. Экспериментальное исследование микроклиматических условий и факторов их формирования в нефтяной шахте / Ю.А. Клюкин, М.А. Семин, А.В. Зайцев // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 63-75.

51. Коноплев, Ю. П. Опыт и перспективы развития термошахтной разработки Ярегского месторождения высоковязкой нефти / Ю. П. Коноплев, А. А. Алабушин, В. Э. Гуляев // Высоковязкие нефти и природные битумы: проблемы и повышение эффективности разведки и разработки месторождений: Материалы международной научно-практической конференции. — Казань. — 2012. — С. 74-77.

52. Коноплев, Ю.П. Научно-методические основы проектирования и анализа термошахтной разработки нефтяных месторождений: диссертация на соискание _____ ученой степени доктора технических наук / Коноплев Юрий Петрович. – М., 2004. – 253 с.

53. Коробицына М.А. Нормализация параметров микроклимата за счет снижения теплопоступлений при транспортировке нефтесодержащей продукции в буровых галереях нефтяных шахт / Коробицына Мария Александровна. – Санкт-Петербург, 2019. – 91 с.

54. Круглов, Ю. В. Варианты применения закрытой системы сбора нефти, работающей в автоматическом режиме, в нефтяных шахтах // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2017. – №15. – С. 329-332.

55. Круглов, Ю. В. Разработка закрытой системы сбора нефти, работающей в автоматическом режиме, для условий нефтяных шахт Ярегского месторождения 79 шахтах // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2016. — №14. — С. 294-297.

56. Куцев, А. Р. Численное моделирование нестационарного процесса сопряженного теплообмена между горным массивом и рудничным воздухом с использованием технологии NVIDIA CUDA / А.Р. Куцев //Первый национальный суперкомпьютерный форум. Переславль-Залесский: Изд-во Ин-та программных исследований РАН. – 2012. – С. 35-37.

57. Лапшин, А. А. Математическое моделирование процессов нормализации микроклимата в глубоких рудных шахтах / А.А. Лапшин //Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – №. 3. – С. 137-144.

58. Левин, Л.Ю. Математическое прогнозирование микроклиматических параметров в горных выработках нефтяных шахт / Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев, Ю.А. Клюкин, М.А. Семин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 4. – С. 294-309.

59. 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.

60. Левин, Л.Ю. Особенности добычи высоковязкой нефти на примере Ярегского месторождения / Левин Л.Ю., Кормщиков Д.С. // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т.4., № 2. – С. 33-36.

61. Левин, Л.Ю. Оценка эффективности системы распределенной подачи охлажденного воздуха как способа управления микроклиматическими параметрами шахт / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, Ю.А. Клюкин //Горный информационно-аналитический бюллетень – 2013. – № 12. – С. 185-189.

62. Левин, Л.Ю. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, А.В. Зайцев // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 154-161.

63. Левин, Л.Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки шахт и рудников: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Левин Лев Юрьевич. — Пермь: 2010. — 274 с.

64. Липаев, А.А. Геотепловое моделирование многослойных нефтяных пластов / А.А. Липаев, Д.В. Шевченко, В.А. Чугунов, Р.Н. Бурханов. – Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. – 236 с.

65. Липаев, А.А. Разработка месторождений тяжелых нефтей и природных битумов. – М.: Институт компьютерных исследований, 2013. – 484 с.

66. Лялько, В.И. Методы расчета тепло- и массопереноса в земной коре. – Киев: Наукова думка, 1974. – 129 с.

67. Мартынов, А.А. Способы уменьшения теплоотдачи горного массива и потерь холода при нормализации тепловых условий в глубоких шахтах / А.А. Мартынов, Г.Г. Литвинский, А.В. Мартовицкий // Горный информационноаналитический бюллетень. – 2005.– Т.29.– №1.– С. 83-90.

68. Михеев М. А. Основы теплопередачи. - Л.: ГЭИ, 1956, - 390 с

69. Николаев, А.В. Способ отдельного проветривания уклонных блоков и подземных горных выработок нефтяной шахты / А.В. Николаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т.15, №20. – С.293–300.

70. Николаев, А.В. Об энерго- и ресурсосберегающем проветривании подземных горных выработок нефтешахт / А.В. Николаев, Г.З. Файнбург //

Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 14. – С. 92–98.

71. Нор, М.А. Источники нагревающего микроклимата при разработке месторождений высоковязких нефтей термошахтным способом / М.А. Нор, Е.В. Нор, Н.Д. Цхадая // Записки Горного института. – 2017. – Т. 225. – С. 360-363.

72. Ониани, Ш.И. Некоторые вопросы тепломассообмена в горных выработках глубоких шахт / Ш.И. Ониани, О.А. Ланчава // Georgian Scientists. - 2021. - №3.

73. Патент № 2757609 С1 Российская Федерация, МПК E21F 1/00. Устройство для эксплуатационной и аварийной вентиляции протяженной тупиковой горной выработки: № 2021106635: заявл. 15.03.2021: опубл. 19.10.2021 / С. Г. Гендлер, А. С. Серегин, **И. Р. Фазылов**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

74. Первые результаты подземно-поверхностной системы термошахтной разработки / Ю.П. Коноплев, Б.А. Тюнькин, Л.Г. Груцкий [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 1. – С. 38-40.

75. Перспективы шахтной и термошахтной разработки нефтяных месторождений / А.А. Боксерман, Ю.П. Коноплев, Б.А. Тюнькин [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 11. – С. 42-45.

76. Подземно-поверхностный способ разработки месторождения высоковязкой нефти: Пат. 2199657 Рос. Федерация. МПК E 21В 43/24 (2000.01) / Ю.П. Коноплев, Б.А. Тюнькин, Л.Г. Груцкий., В.В. Питиримов, А.А. Пранович; заявитель и патентообладатель ООО «ЛУКОЙЛ-Коми». – № 2001110539/03; заявл. 17.04.2001; опубл. 27.02.2003. – Бюл. № 6. – 7 с.

77. Подземно-поверхностный способ термошахтной разработки. Опыт закачки воды / Ю.П. Коноплев, Б.А. Тюнькин, Л.Г. Груцкий [и др.] // Проблемы

освоения Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции: сб. тр. ин-та Печорнипинефть. – Ухта, 2002. – С. 122-128.

78. Правила безопасности в угольных шахтах. Приказ Ростехнадзора № 550 от 19.11.2013. — 2014. - URL: http://inoteh-prk.ru/docs/pravo/pb_um.pdf (дата обращения: 09.09.2023)

79. Правила безопасности при разработке нефтяных месторождений шахтным способом. Приказ Ростехнадзора № 501 от 28.11.2016. — URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rostekhnadzora-ot-28112016-n-501-ob-utverzhdanii-federalnykh/> (дата обращения: 25.05.2023)

80. Прищепа, О. Трудноизвлекаемая нефть: потенциал, состояние и возможности освоения / О. Прищепа, Э. Халимов // Нефтегазовая вертикаль. - 2011. - № 5. - С. 24-29.

81. Решение о выдаче патента. Заявка № 2023123269/03(051237). Устройство для принудительного проветривания рабочих мест / С. Г. Гендлер, А.В. Виленская, **И. Р. Фазылов**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

82. Родак, В.П. Регулирование теплового режима нефтяного пласта и горных выработок при добыче нефти шахтным способом на Ярегском месторождении: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Родак Владимир Прокофьевич. – Санкт-Петербург, 1996. – 165 с.

83. Рубинштейн, Л. И. Температурные поля в нефтяных пластах. – М.: Недра, 1972. – 276 с.

84. Рудаков, М. Л. О возможности нормализации температуры воздуха в буровых галереях нефтяных шахт / М. Л. Рудаков, М. А. Коробицына // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 8. – С. 66-71

85. Рудаков, М.Л. Определение области применения интегральных показателей тепловой нагрузки среды в горных выработках нефтяных шахт /

М.Л. Рудаков, И.С. Степанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - № 6; Спец. вып. 35. – С. 3-14.

86. Рудаков, М.Л. Оценка профессионального риска при воздействии нагревающего микроклимата при ведении подземных горных работ / М.Л. Рудаков, И.С. Степанов // Записки Горного института. – 2017. – Т. 225. – С. 364-368.

87. Рузин, Л. М. Разработка залежей высоковязких нефтей и битумов с применением тепловых методов: учеб. пособие / Л. М. Рузин, О. А. Морозюк. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ухта: УГТУ, 2015. – 166 с.

88. Руководство по проектированию вентиляции шахт. — М.: Недра, 1975 г. - 238 с.

89. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания - 2021 - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 30.01.2024)

90. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. 2.2.4. Физические факторы производственной среды – 1996 – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901704046> (дата обращения: 25.12.2023)

91. Семин, М.А. Моделирование фильтрации нефти в трещиновато-пористом пласте в условиях Ярегского месторождения высоковязких нефтей / М.А. Семин, Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 3. – С. 278-291.

92. Система обеспечения безопасных условий труда в нефтяных шахтах, работающая по принципу Бережливого производства / А. В. Николаев, П. В. Максимов, А. В. Кычкин, В. П. Постников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2022. - Вып. 2. - С. 102-113.

93. Смирнова, Н.Н. Определение тепловых потерь при закачке пара в нефтяной пласт / Н.Н. Смирнова Н.Н., Н.О. Йиму // Записки Горного Института. — 2005. — № 167(1). — С. 295-298.

94. Смирнова, Н. Н. Методы исследования фильтрационного теплообмена в сложных горно-геологических условиях / Н.Н. Смирнова // Записки Горного Института. — 2005. — С. 207-211.

95. Создание безопасных условий труда в нефтяных шахтах при тепловом воздействии на пласт / Н.Д. Цхадая, А.Е. Жуйков, З.Х. Ягубов, Э.З. Ягубов // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 9. – С. 121-123.

96. Соловьев, Д.Е. Прогноз теплового режима рудника с учетом динамики развития горных работ / Д.Е. Соловьев, Ю.А. Хохолов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 5. – С. 270-275.

97. Способ разработки месторождения высоковязкой нефти: пат. 2114289 Рос. Федерация: МПК Е 21В 43/24 (1995.01) / Тюнькин Б.А., Букреев В.М., Груцкий Л.Г. [и др.]; заявитель и правообладатель: Тюнькин Б.А., Букреев В.М., Груцкий Л.Г., Коноплев Ю.П., Пранович А.А., Питиримов В.В., Шешуков В.Е. – № 97103294/03; заявл. 12.03.1997; опубл. 27.06.1998. – 4 с.

98. Степанов, И. С. Обоснование метода оценки профессионального риска для условий нагревающего микроклимата при проведении горных работ на нефтяных шахтах: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Степанов Игорь Сергеевич; Санкт-Петербургский горный университет. - СПб, 2018. — 22 с.

99. Сучков, А. Н. Технология изоляции стенок Подземных выработок / А. Н. Сучков, П. П. Шведик // Уголь Украины. – 2000.– №1. – С. 20-22.

100. Термошахтная разработка месторождений с тяжелыми нефтями и природными битумами (на примере Ярегского нефтяного месторождения) / Ю.П. Коноплев, В.В. Питиримов, В.П. Табаков, Б.А. Тюнькин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 3. – С. 246-253.

101. Термошахтная разработка нефтяных месторождений / Ю.П. Коноплев [и др.]; под ред. Н.Д. Цхадая. – М.: Недра, 2006. – 287 с.

102. Технологическая схема опытных работ по испытанию различных систем термошахтной разработки в блоке «Блок №14» НШ-3 Ярегского месторождения: Отчет о НИР по договору №109/2000 / Печорнипинефть. – Ухта, 2001. – Т. 1 – 188 с. – Т. 2 – 118 с.

103. Технологическая схема разработки опытного участка в блоке 4Т-2 НШ-1 по одногоризонтной системе с применением термоизолированных колонн: Отчет о НИР, договор № 97/2000 / Печорнипинефть. – Ухта, 2000. – 102 с.

104. Технологическая схема термошахтной разработки опытного участка с нагнетанием теплоносителя через скважины с поверхности: Отчет о НИР по договору подряда № 16/97/ТОО термогранд. – Ухта, 1997. – 97 с.

105. Технологические принципы разработки залежей аномально вязких нефтей и битумов / Л.М. Рузин, И.Ф. Чупров, О.А. Морозюк, С.М. Дуркин // 2-е изд., пер. и доп. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. – 480 с.

106. **Фазылов, И. Р.** Адаптация методики расчета температуры воздуха в горных выработках нефтешахт / **И. Р. Фазылов** // Актуальные проблемы недропользования: Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 года. Том 3. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 75-76.

107. **Фазылов, И. Р.** Оценка эффективности методов регулирования теплового режима нефтяных шахт России / **И. Р. Фазылов**, С. Г. Гендлер // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № S6. – С. 289-299.

108. **Фазылов, И. Р.** Результаты исследования теплового режима горных выработок уклонных блоков нефтяных шахт при термошахтном способе

добычи нефти / **И. Р. Фазылов** // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 465-468.

109. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы" № 520 - 2020 - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140267> (дата обращения: 16.02.2024)

110. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых" № 505 - 2020 - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (дата обращения: 21.02.2024)

111. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» № 534 - 2023 - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573230594> (дата обращения: 21.02.2024).

112. Фролов, Н.М. Основы гидрогеотермии / Н.М. Фролов. – М.: Недра, 1991. – 334 с.

113. Хохолов, Ю. А. Математическое моделирование процессов теплообмена вентиляционного воздуха с горными породами в протяженных выработках шахт и рудников криолитозоны / Ю. А. Хохолов, А. С. Курилко // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2015. – №. 3 (79). – С. 50-54.

114. Цхадая, Н.Д. Комплексная оценка условий труда в нефтяных шахтах при паротепловом воздействии на пласт / Н.Д. Цхадая. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 1997. – 120 с

115. Цхадая, Н.Д. Нефтяная шахта: источники опасности и методы предотвращения аварийных ситуаций / Н.Д. Цхадая // Безопасность труда в нефтяной промышленности. – 1998. – Вып. 12. – С. 48-49

116. Черняк, В.П. Нестационарный теплоперенос в разрушаемых массивах горных пород / В.П. Черняк, В.А. Киреев, А.С. Полубинский // Киев, Наукова думка, 1992. - 222 с.

117. Шувалов, Ю. В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера / Ю.В. Шувалов. – М.: Издательство Ленинградского университета, 1988. – 196 с.

118. Шувалов, Ю.В. Опыт и совершенствование регулирования теплового режима шахт и рудников ФРГ / Ю.В. Шувалов, В.А. Кузин, А.Н. Худяков — М.: Изд-во ЦНТУ "Недра", 1990. — 51 с.

119. Шувалов, Ю.В. Теория и практика оптимального управления тепловым режимом подземных сооружений криолитозоны / Ю.В. Шувалов, А.Ф. Галкин // Горный информационноаналитический бюллетень. — 2010. - № 8. — С. 365-370.

120. Щербань, А. Н. Охлаждение и осушение воздуха в глубоких угольных шахтах / А. Н. Щербань, О. А. Кремнев, И. И. Чернобыльский // Изд. Академии наук Украинской ССР, - К. – 1956. – С. 51-57.

121. Щербань, А.Н. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. Т.1. / А.Н. Щербань, О.А. Кремнев // Киев, Изд-во АН СССР, 1959. - 431 с.

122. Щербань, А.Н. Руководство по регулированию теплового режима шахт / А.Н. Щербань, О.А. Кремнев, В.Я. Журавленко // М.: Недра, 1977. - 359 с.

123. Alabyev, V. R. Peculiarities of heat-mass-exchange processes in faces developing steep coal seams / V. R. Alabyev, M. L. Rudakov, M. A. Korobitsyna // International Journal of Pure and Applied Mathematics. - 2017. - № 114. - P. 349-400.

124. Borehole stress monitoring analysis on advanced abutment pressure induced by Longwall / Zh. Nong, Zh. Nianchao, H. Changliang [et al.] // Mining. Arabian Journal of Geosciences. - 2014. - P. 457–463.

125. Collins, K.J. Cold stress and cardiovascular reactions: Problems with Cold Work / Ed.I. Holmer, K. Kuklane // Arbetslivsinstitutet. – 1988. – №18. – Pp.166-171.

126. Di Donato, G. Streamline-based dual-porosity simulation of reactive transport and flow in fractured reservoirs / G. Di Donato, M. J. Blunt // Water Resources Research. – 2004. – V. 40. - № 4. – P. 12-14.

127. **Fazylov, I. R.** Adaptation of the methodology for calculating the air temperature in mine workings for the conditions of oil mines / **I. R. Fazylov**, S. G. Gendler // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers. Scientific conference abstracts, St Petersburg, 31 мая – 06 2021 года. Vol. 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – P. 169-170.

128. Fletcher, C. A. J. Computational Techniques for Fluid Dynamics / C. A. J. Fletcher // 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag. - 1988.- Vol. 1. Fundamental and General Techniques. - 410 p.

129. Gendler, S. G. Forecasting the thermal regime of mine workings in oil mines / S. G. Gendler, **I. R. Fazylov** // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Scientific conference abstracts, St Petersburg, 17–19 июня 2020 года. Vol. 1. – St Petersburg: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – P. 289-290.

130. Gendler, S. G. Methods of regulation air temperature in the Russian oil mains / S. G. Gendler, **I. R. Fazylov** // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019: 15th, St. Petersburg, 17–19 мая 2019 года. Vol. 1. – St. Petersburg, 2020. – P. 16-21.

131. Hall, A. E. The use of controlled recirculation to conserve energy / A. E. Hall // Mine Vent. Proc. 2-nd US Mine Symp., Boston — 1985. — P. 207-215.

132. McPherson, M. J. Subsurface ventilation and environmental engineering
/ M.J. McPherson // Springer Science & Business Media.- 2012. - P. 904.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2757609

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ И
АВАРИЙНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРОТЯЖЕННОЙ
ТУПИКОВОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Гендлер Семён Григорьевич (RU), Серегин Александр Сергеевич (RU), Фазылов Ильдар Робертович (RU)*

Заявка № **2021106635**

Приоритет изобретения **15 марта 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **19 октября 2021 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **15 марта 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ильин



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт об использовании результатов кандидатской диссертации

Утверждаю

Первый заместитель генерального
директора - Главный инженер
ООО «ЛУКОЙЛ-Коми».

Баталов Д.А.

« 21 » _____ 2023 г.

АКТ

об использовании результатов
кандидатской диссертации
Фазылова Ильдара Робертовича

по научной специальности 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Специальная комиссия ПАО «ЛУКОЙЛ» в составе:

Председатель:

Начальник Управления ПБ
ПАО «ЛУКОЙЛ».

Абашин Александр Николаевич

Члены комиссии:

Начальник Управления ОТ, ПБ, ООС и КН
ООО «ЛУКОЙЛ-Коми»

Прокопив Мирослав Максимович

Начальник отдела ПБ и ОТ
ПАО «ЛУКОЙЛ»

Коновалов Сергей Иванович

Начальник Отдела ОТ и ПБ
ООО «ЛУКОЙЛ-Коми».

Московкин Вячеслав Витальевич

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Теплофизическое обоснование параметров системы регулирования теплового режима горных выработок при термошахной добыче нефти», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, используются в «ПАО «ЛУКОЙЛ» при проектировании мероприятий по повышению безопасности работ при эксплуатации нефтяных шахт.

Представленные в диссертационной работе результаты исследований позволяют на основе выявленных закономерностей формирования теплового режима горных выработок нефтяных шахт, выполнить оценку степени влияния на термодинамические параметры рудничного воздуха основных технологических факторов, что даст возможность предложить рациональные мероприятия по нормализации климатических условий.

Председатель комиссии

Начальник Управления ПБ и ОТ



Абашин А.Н.

Члены комиссии:

Начальник Управления ОТ, ПБ, ООС и КН
ООО «ЛУКОЙЛ-Коми»



Прокопив М.М.

Начальник отдела ПБ и ОТ
ПАО «ЛУКОЙЛ»

Коновалов С. И.

Начальник Отдела ОТ и ПБ
ООО «ЛУКОЙЛ-Коми».



Московкин В. В.

ПРИЛОЖЕНИЕ В**Решение о выдаче патента на изобретение**

Форма № 01 ИЗ-2014

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(РОСПАТЕНТ)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993. Телефон (8-499) 240- 60- 15. Факс (8-495) 531- 63- 18

На № - от -

Наш № 2023123269/03(051237)

*При перетиске просим сослаться на номер заявки***Исходящая корреспонденция от****04.03.2024**

ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный университет", Патентно-лицензионный отдел
21 линия, 2
В.О.
Санкт-Петербург
199106

РЕШЕНИЕ**о выдаче патента на изобретение**

(21) Заявка № 2023123269/03(051237)

(22) Дата подачи заявки 19.07.2023

В результате экспертизы заявки на изобретение по существу установлено, что заявленное изобретение относится к объектам патентных прав, соответствует условиям патентоспособности, сущность заявленного изобретения (изобретений) в документах заявки раскрыта с полнотой, достаточной для осуществления изобретения (изобретений)*, в связи с чем принято решение о выдаче патента на изобретение.

Заключение по результатам экспертизы прилагается.

Приложение: на 5 л. в 1 экз.

Начальник Управления
организации
предоставления
государственных услуг

Документ подписан электронной подписью
Сведения о сертификате ЭП
Сертификат
0418DAB1005EB00DA040076C1111D2C713
Владелец Травников
Дмитрий Владимирович
Срок действия с 14.08.2023 по 14.08.2024

Д. В. Травников



*Проверка достаточности раскрытия сущности заявленного изобретения проводится по заявкам на изобретения, поданным после 01.10.2014.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРТИЗЫ

(21) Заявка № 2023123269/03(051237) (22) Дата подачи заявки 19.07.2023
(24) Дата начала отсчета срока действия патента 19.07.2023

ПРИОРИТЕТ УСТАНОВЛЕН ПО ДАТЕ

(22) подачи заявки 19.07.2023

(72) Автор(ы) Гендлер Семён Григорьевич, Фазылов Ильдар Робертович, Виленская Анастасия Викторовна, RU

(73) Патентообладатель(и) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет", RU

(54) Название изобретения УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ РАБОЧИХ МЕСТ

(см. на обороте)

01	2	ДОМ 19.01.2024 ИЗФ 19.01.2024	030406
----	---	----------------------------------	--------

ВНИМАНИЕ! С целью исключения ошибок просьба проверить сведения, приведенные в заключении, т.к. они без изменения будут внесены в Государственный реестр изобретений Российской Федерации, и незамедлительно сообщить об обнаруженных ошибках.