

На правах рукописи

Фазылов Ильдар Робертович



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

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Гендлер Семен Григорьевич

Официальные оппоненты:

Зайцев Артем Вячеславович

доктор технических наук, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория развития горного производства, заведующий лабораторией;

Николаев Александр Викторович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра Горной электромеханики, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **27 июня 2024 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 27 апреля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования:

Безопасная и эффективная разработка нефтяных месторождений термощахтным методом определяется возможностью обеспечения регламентируемых правилами безопасности климатических параметров рудничного воздуха в выработках уклонного блока, которые непосредственно используются для добычи нефти. Согласно результатам натурных исследований, более чем в 40 % блоков зафиксировано превышение нормативного значения температуры воздуха, в связи с этим, возникает необходимость в управлении тепловым режимом горных выработок. Решение этой задачи невозможно без учета сложных тепло-массообменных процессов, имеющих место, как при прогреве нефтяного пласта высокотемпературным теплоносителем, так и между рудничным воздухом и неоднородным горным массивом, окружающим горные выработки уклонного блока. Несмотря на то, что исследованию динамики тепло-массопереноса в горных выработках шахт и рудников было посвящено значительное количество научных работ отечественных и зарубежных авторов, особенности процессов, определяющих тепловой режим горных выработок для условий нефтяных шахт при использовании термического метода добычи нефти, изучены недостаточно. Существующие методы не позволяют выполнить корректный прогноз теплового режима горных выработок уклонных блоков нефтяных шахт и разработать систему технических мероприятий, направленных на нормализацию термодинамических параметров воздушной среды.

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.

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 работы:

1. Выявлены закономерности процессов теплопереноса 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 теплопереноса 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.

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.).

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 теплопереноса в горных выработках нефтяных шахт; статистический анализ данных по случаям паропроявлений; математическое моделирование процессов тепло-массопереноса на основе программного продукта Ansys CFX.

На защиту выносятся следующие положения:

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 данных 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, 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 и 1 решение о выдаче патента на изобретение.

Структура работы. 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 Серегину А.С. за помощь в проведении натурных исследований и компьютерного моделирования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность исследования, цель, задачи работы, научная новизна и основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны закономерности формирования теплового режима горных выработок при добыче полезного ископаемого в условиях термических аномалий. Выполнен обзор исследований отечественных и зарубежных ученых, изучавших проблемы формирования теплового режима горных выработок. Осуществлен обзор факторов, влияющих на формирование теплового режима горных выработок в условиях нагревающего микроклимата на примере шахт и рудников, расположенных в зонах естественных и искусственных термических аномалий. Рассмотрены научно-методические подходы к нормированию температуры воздуха в горных выработках.

Во второй главе проанализированы методы и подходы, применяемые в решении теплофизических задач в условиях подземных сооружений. Выполнен обзор эмпирических, аналитических и численных методов расчёта теплового режима горных выработок. Рассмотрены методы расчёта тепловыделений от абсолютных и относительных источников теплоты.

В третьей главе представлены сведения об особенностях разработки Ярегского нефтетитанового месторождения термошахтным способом. Подробно описан термошахтный способ добычи нефти, перечислены научные коллективы и ученые, занимающиеся проблемами термошахтной добычи нефти. Описаны особенности формирования теплового режима горных выработок при подземно - поверхностной системе разработки. Перечислены факторы, влияющие на термодинамические параметры микроклимата в горных выработках нефтяных шахт в зависимости от технологии термического воздействия на нефтесодержащий коллектор и времени разработки уклонных блоков.

В четвертой главе представлена математическая модель процессов теплопереноса в условиях нефтяных шахт. Предложена методика расчёта температуры воздуха для выработок уклонного блока нефтяных шахт, которая позволяет учитывать неоднородности температурного поля в массиве, окружающего горные выработки, теплообмен воздуха с транспортируемой нефтесодержащей жидкостью и поступающего пара. Проанализировано влияние на термодинамические параметры горных выработок различных способов управления тепловым режимом и дана оценка их эффективности в широком диапазоне горнотехнических условий. Осуществлена оценка эффективности предложенного инновационного подхода к нормализации теплового режима в буровой галерее, позволяющего обеспечить в рабочих зонах допустимые значения температуры воздуха. Представлены результаты математического моделирования аэротермодинамического режима буровой галереи при использовании предложенного технического решения.

В заключении обобщены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

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.

На различных этапах разработки уклонного блока, тепловое воздействие на пласт характеризуется изменением темпов закачки пара и увеличением проницаемости нефтесодержащего коллектора. В зависимости от степени разработки нефтяного пласта, на тепловой режим горных выработок оказывают влияние различные источники теплоты. Условно, воздействие теплоносителя на тепловой режим горных выработок можно разделить на 3 стадии.

Первая или начальная стадия разработки уклонного блока характеризуется интенсивной закачкой пара для быстрого разогрева пласта. На уклонных блоках, разрабатываемых на Ярегском месторождении, начальная стадия длится до 3 лет с начала разработки блока. Основным источником тепловыделений в буровую галерею на первой стадии разработки является нефтесодержащая жидкость (НСЖ), температурой до 110 °С. Температура стенок выработок, при этом, также постепенно увеличивается до 50 °С.

На второй стадии объемы закачки пара снижаются, температура пласта поддерживается на уровне 80-90 °С. Длительность второй стадии 3-7 лет от начала разработки блока. Этот этап разработки характеризуется уменьшением температуры добываемой нефтесодержащей жидкости и дебита нефти. Температура стенок выработок стремится к 60 °С.

В период третьей стадии (более 7 лет разработки блока), повышение фильтрационных свойств нефтяного пласта приводит к учащению случаев прорыва пара в выработки. Температура добываемой жидкости снижается. Но из-за влияния поступающего пара температура стенок выработок остается на прежнем уровне, что обуславливает повышение температуры воздуха в добычной галерее.

График изменения температуры нефтесодержащей жидкости, стенок выработок и дебита нефти в зависимости от стадии разработки представлены на рисунке 1.

Осложняющим фактором при осуществлении прогноза и регулирования теплового режима горных выработок уклонных блоков является стохастический характер поступления пара в воздушную

среду из массива, трещин или добывающих скважин. Выполненный анализ натуральных данных дает основание утверждать, что поступление пара превалирует на третьей стадии разработки блока, что связано с увеличением фильтрационных свойств массива.

Выше сказанное подтверждается натурными измерениями термодинамических параметров и последующим вычислением энтальпии и доли скрытой теплоты в структуре теплового баланса выработки. Так, из рисунка 2 следует, что удельное приращение энтальпии воздуха увеличивается по мере отработки блока. При этом, доля скрытой теплоты в структуре теплового баланса повышается до 85-90 % (рисунок 3). Это объясняется приближением теплового фронта с температурой, равной температуре нагнетаемого пара, от нагнетательных скважин к горным выработкам, а также увеличением интенсивности влагообменных процессов (прорывов пара).

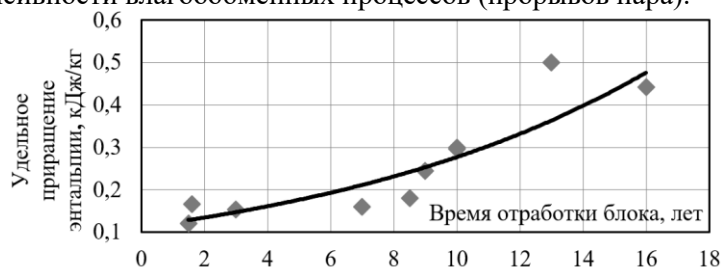


Рисунок 2 — Удельное приращение энтальпии воздуха в буровой галерее, в зависимости от периодов разработки блока

Структура теплового баланса, определяемая долей тепловыделений от основных источников теплоты вычислена в результате обработки экспериментальных данных, представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Значимость тепловыделений от различных источников на различных стадиях разработки уклонного блока

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

Вместе с тем, из результатов натуральных исследований, становится ясно, что по мере разработки блока, происходит увеличение доли скрытой теплоты по отношению к явной теплоте, что свидетельствует об увеличении влагосодержания шахтного воздуха в буровой галерее. График изменения доли скрытой теплоты в тепловом балансе представлен на рисунке 3.

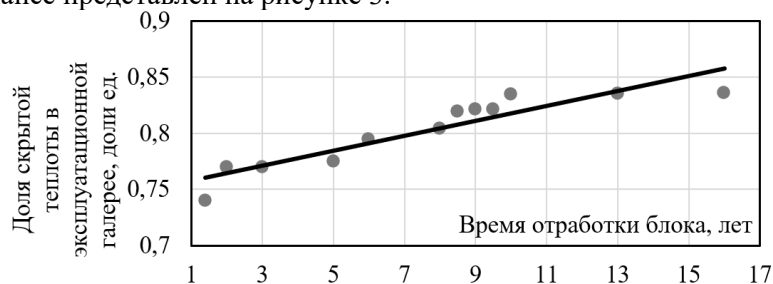


Рисунок 3 — Соотношение между скрытой и явной теплотой в буровой галерее в зависимости от времени разработки блока

Из результатов натуральных исследований уклонного блока, находящегося на третьей стадии разработки (рисунок 4), определено, что значительная часть приращения энтальпии (dI) осуществляется за счёт скрытой теплоты (dD).

Для расчёта и прогнозирования теплового режима горных выработок уклонного блока необходимо учитывать стадию разработки блока после ранжирования источников теплоты, определяющих термодинамические параметры воздуха.

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

Существующие методы расчёта термодинамических параметров воздуха в шахтах и рудниках, в том числе методика, разработанная в Горном университете под руководством профессора Дядькина Ю.Д., не учитывает закономерности формирования теп-

лового режима добычных выработок нефтяных шахт, в частности, сложную динамику температуры нефтяного коллектора, прогреваемого в результате закачки пара, определяющую температуры поверхностей горных выработок уклонных блоков, а также тепловой эффект пара, периодически поступающего в буровую галерею с температурой 95 °С -100 °С.

На основании обработки данных натуральных измерений установлено, что средние температуры поверхностей горной выработки, определяются с достаточной точностью (корреляционное соотношение не менее 0,9) (таблица 2).

Таблица 2 - Средние температуры поверхностей обнажения горного массива, окружающего буровую галерею

Поверхность выработки	Средняя температура поверхности обнажения
Нефтяной пласт	$T_{об.пл.} = 24,17\ln(\tau) + 16,146$
Кровля	$T_{об.кр.} = 13,023\ln(\tau) + 32,638$
Почва	$T_{об.пч.} = 24,17\ln(\tau) + 26,146$
Противоположная обнажению пласта стенка «Холодная стенка»	$T_{пр.ст.} = 6,4164\ln(\tau) + 18,266$

В свою очередь, количество пара было рассчитано исходя из разницы между значениями температур воздуха в конце буровой галереи для случаев поступления пара из нефтяного коллектора и его отсутствия.

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

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

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

где коэффициенты А и В и g, зависящие от показателей, определяющих теплообмен в системе рудничный воздух, неоднородный

горный массив, транспортируемая нефтесодержащая жидкость в лотке и поступающий из нефтяного коллектора пар, устанавливаются по формулам (2-4):

$$A = \frac{\sum_{i=1}^4 (a_{т.и} U_i + k_{т.л} U_l + r_{п} \frac{760}{P} \Delta \varphi n + C_{п} q_{п} \Delta \eta(y))}{G c_{эф}} \quad (2)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^4 (a_{т.и} U_i T_i) + k_{т.п.л.} u_{л} \theta_{н.с.ж.} - r_{п} \frac{760}{P} \Delta \varphi m + (C_{п} q_{п} T_{п} + r q_{п} \Delta \eta(y))}{G c_{эф}} \quad (3)$$

$$g = \frac{760 r \Delta \varphi}{P C_{эф}} \quad (4)$$

В зависимостях (2) и (3) y – продольная координата, м; t – температура воздуха, °С; $c_{эф}$ – эффективная теплоёмкость, определяемая по формуле (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); $q_{п} = Q_{пар}/(l_{к} - l_{н})$; $\Delta \varphi$ – изменение относительной влажности на участке j буровой галереи, доли ед. ($j=1,2,3$); $\Delta \varphi = \varphi_{j,н} - \varphi_{j,к}$; m и n – коэффициенты из аппроксимационной зависимости влагосодержания насыщенного пара от температуры кг/кг, кг/(кг °С); $\Delta \eta(y)$ – единичные функции Хевисайда, определяемые по формуле (6):

$$C_{эф} = C_p + \frac{760}{P} r \varphi_{н,j} n \quad (5)$$

$$\Delta \eta(y) = \eta(y - l_{н}) - \eta(y - l_{к}) \quad (6)$$

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

Уравнение (1) дополняется дифференциальным уравнением (7) теплового баланса относительно температуры нефтесодержащей жидкости $\theta_{н.с.ж.}$ в лотке.

$$c_{н.ж} W_{н.ж} \frac{d\theta_{н.с.ж.}}{dy} = -k_{т.п.л.} U_{л} (\theta_{н.с.ж.} - t) \quad (7)$$

По существу, уравнение (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 $t_{j=1,k}$, поступившей с предыдущего участка, относительно конечной температуры $t_{j=2,k}$ имеет стандартный вид, представленный в уравнении (8):

$$t(y) = \frac{B}{A} + (At_0 - B)(1 + gy)^{-A/g} \quad (8)$$

При отсутствии поступления пара в воздух, буровая галерея рассматривается как единая выработка с длиной $L_{гал}$. При этом, члены $C_p q_p$ и $q_p(C_p T_p + r)$ в формуле (2) и в формуле (3) принимаются равными нулю.

Из графика на рисунке 5 наблюдается сходимость результатов натуральных измерений и расчётных значений температуры воздуха в блоке, что свидетельствует о возможности применения предлагаемой методики для расчёта температуры воздуха с дополнительными источниками теплоты.

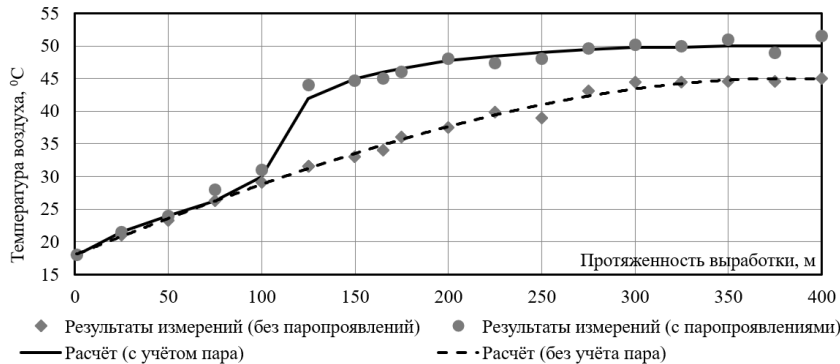


Рисунок 5 — Результаты верификации методики расчёта

Для управления тепловым режимом горных выработок необходимо учитывать паропроявления в выборе мероприятий по снижению температуры воздуха.

На основе вышеупомянутой методики, выполнена оценка эффективности мероприятий по снижению температуры воздуха. Таким образом, из результатов натурных исследований, и оценки потенциальной возможности применения способов регулирования теплового режима (рисунок 6, 7), следует, что ни один из способов не позволяет обеспечить нормативные значения температуры воздуха во всей буровой галерее.

3. Локальная нормализация теплового режима в рабочих зонах буровой галерей в период превышения нормативных значений температуры воздуха достигается за счёт принудительной подачи в них воздуха с температурой, обеспечивающей нормативные значения параметров воздушной среды.

Исходя из результатов оценки эффективности способов регулирования теплового режима горных выработок, предлагается отойти от концепции охлаждения всей буровой галереи и перейти к обеспечению нормативных значений температуры воздуха непосредственно на рабочей зоне. В связи с этим, 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.

Способ локального проветривания рабочей зоны является дополнением к секционному способу проветривания. На устье скважины, расположенной 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 установлен вентилятор, нагнетающий воздух в воздухопровод, расположенный в буровой галерее. С определенной периодичностью, на воздуховоде имеются U-образные воздушные каналы (ответвления). На воздуховоде установлена система шиберов, позволяющая обеспечить движение воздуха в необходимую рабочую зону. Гео-

метрическая модель выработки с элементами установки представлена на рисунке 8.

Для подтверждения эффективности способа охлаждения воздуха в рабочей зоне выполнены расчёты температуры воздуха по вышеупомянутой методике и компьютерное моделирование воздухораспределения и теплораспределения в программном комплексе Ansys CFX (рисунки 9-11) при подаче воздуха в рабочую зону. Анализ результатов моделирования представлен на рисунке 12.

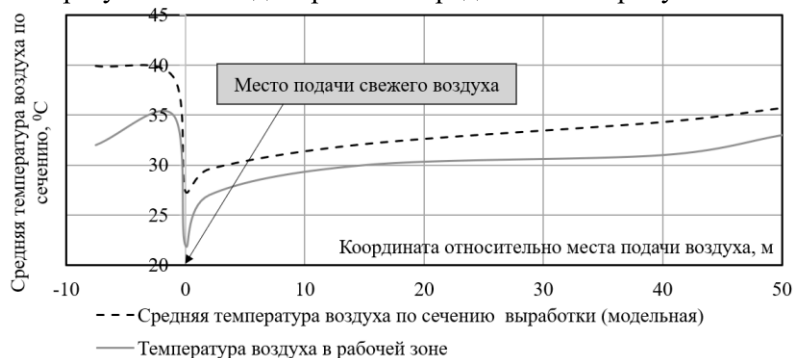


Рисунок 12 — Модельные значения температуры воздуха

Из результатов расчётов и моделирования, определено, что подача воздуха в горную выработку (расход $10 \text{ м}^3/\text{с}$, температура $+15 \text{ }^\circ\text{C}$) позволяет обеспечить нормативные значения температуры воздуха (менее $+36 \text{ }^\circ\text{C}$) на участке до 50 м от места подачи воздуха.

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 теплообмена в условиях горных выработок, позволяющее 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 термошахтным 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 выработки, 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 в 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 температура 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 50 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Гендлер, С. Г. Оценка эффективности методов регулирования теплового режима нефтяных шахт России / С. Г. Гендлер, **И. Р. Фазылов** // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2019 – № S6 – С. 289-299.
2. Гендлер, С. Г. Особенности формирования термодинамических параметров воздушной среды при добыче нефти термо-

шахтным способом / С. Г. Гендлер, **И. Р. Фазылов** // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле – 2021 – № 1 – С. 76-91.

3. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. 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. Taylor & Francis Group 2019. – 2020. – PP. 16-21.

5. 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.

6. 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 – 2022 – № 6-1 – С. 248-262.

Патенты:

7. Решение о выдаче патента. Заявка № 2023123269/03(051237) от 19.07.2023 г. 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».

8. Патент № 2757609 С1 Российская Федерация, МПК E21F 1/00. Устройство для буровой 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 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

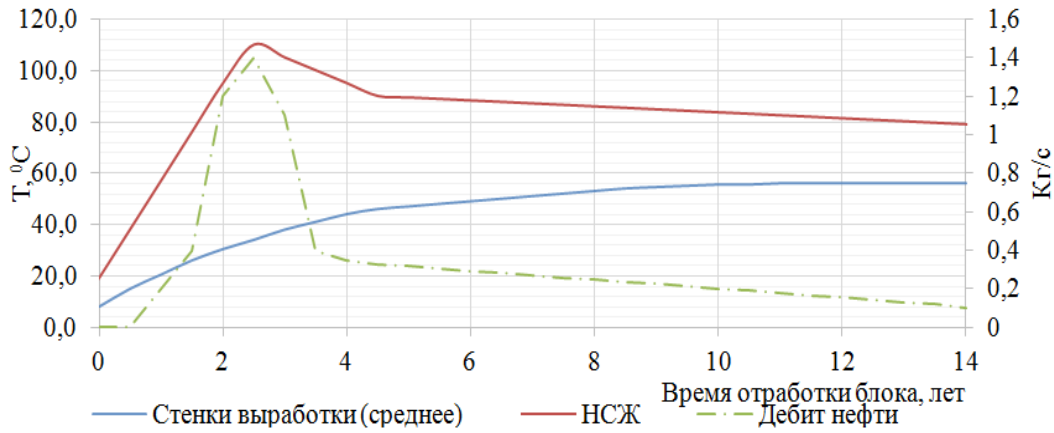


Рисунок 1 — Изменения температуры стенок выработки, нефти и дебита нефти в зависимости от стадии разработки блока

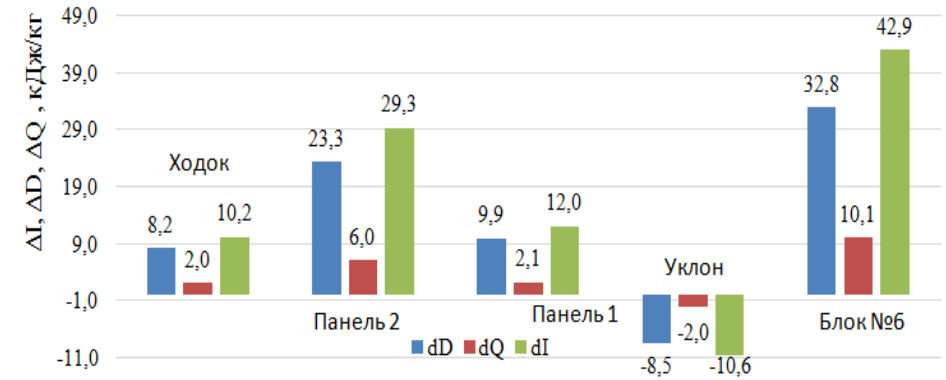


Рисунок 4 - Структура тепловыделений в горных выработках уклонного блока, находящегося на 3 стадии разработки

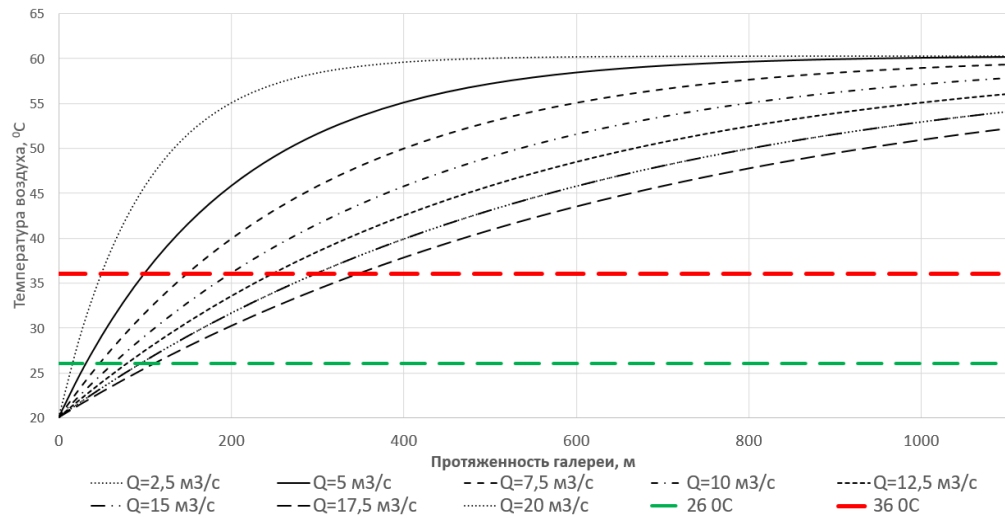


Рисунок 6 – Изменение температуры воздуха в буровой галерее при различных расходах воздуха

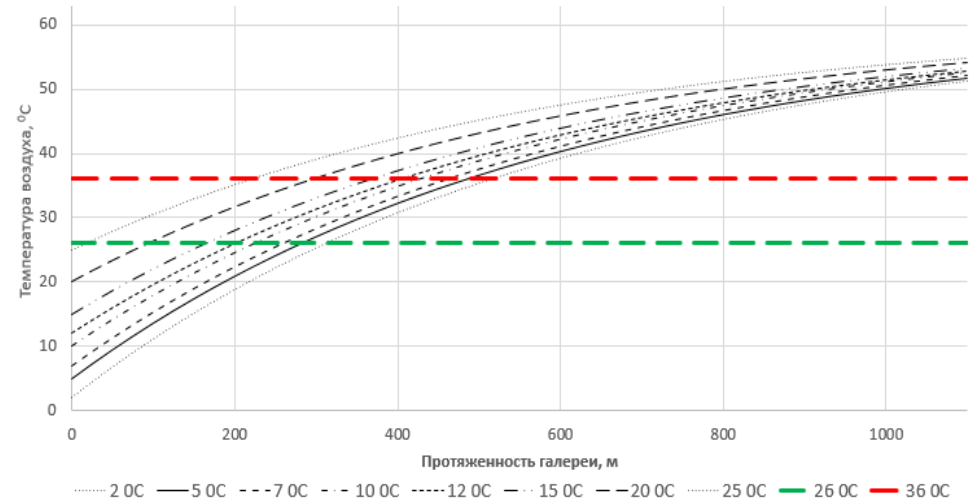


Рисунок 7 – Изменение температуры воздуха в буровой галерее с различной температурой воздуха, поступающей в выработку (расход воздуха 20 м³/с)

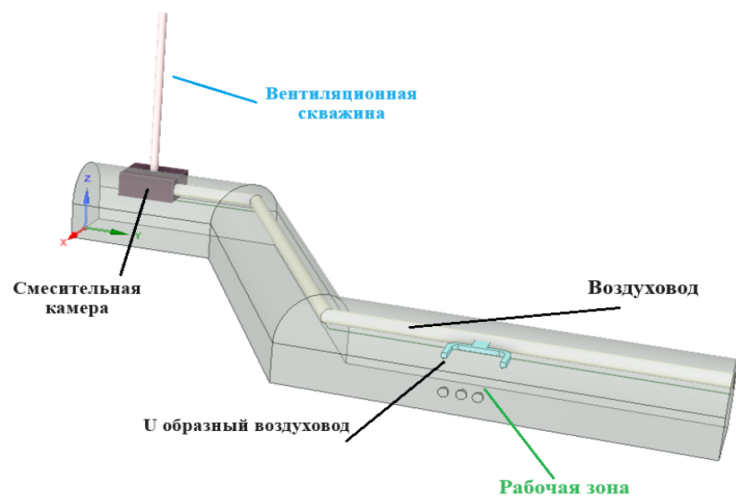


Рисунок 8 – Геометрия установки для локальной подачи воздуха на рабочую зону

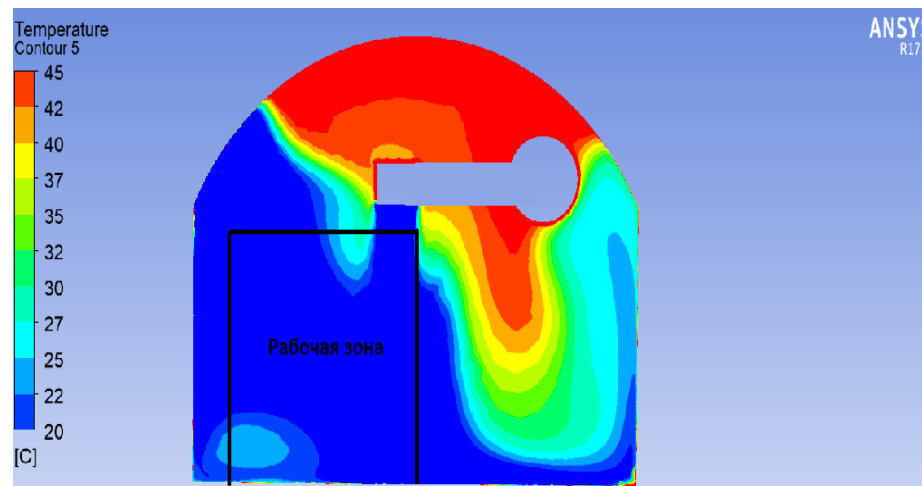


Рисунок 9 – Распределение температуры воздуха в рабочей зоне буровой галереи при локальном проветривании

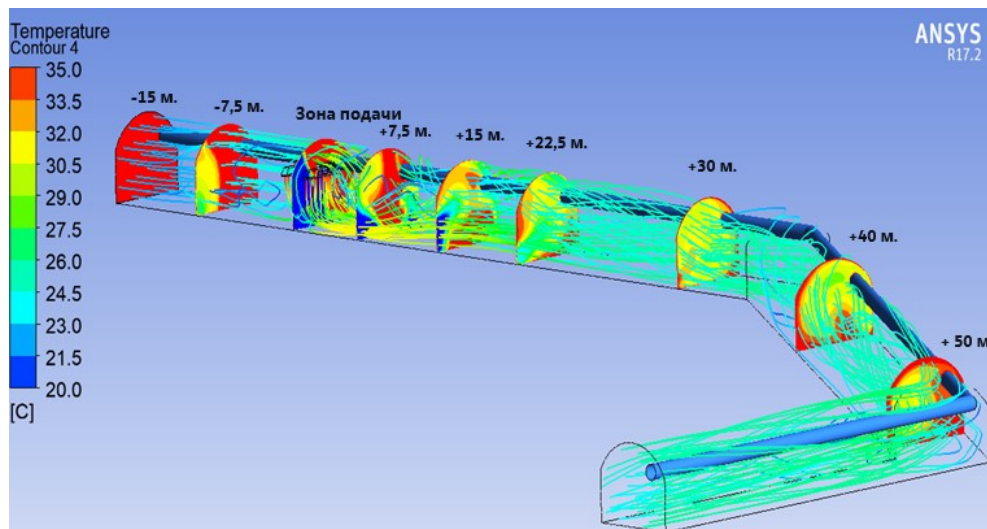


Рисунок 10 – Распределение температур воздуха в буровой галерее при локальном проветривании рабочей зоны

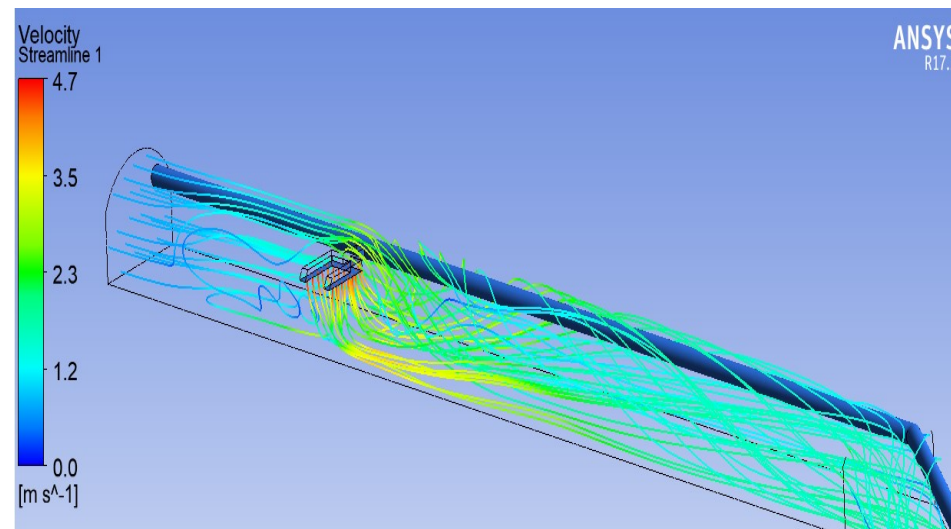


Рисунок 11 – Распределение скоростей воздуха в буровой галерее при локальном проветривании рабочей зоны