

На правах рукописи



**Попов Максим Дмитриевич**

**РАСЧЕТ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В РУДНИЧНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ  
С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОЙ ДЕПРЕССИИ В НАКЛОННЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь 2024

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

**Научный руководитель:** **Левин Лев Юрьевич**  
член-корреспондент РАН, доктор технических наук,  
заведующий отделом аэрологии и теплофизики  
«ГИ УрО РАН» (г. Пермь)

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

**Родионов Владимир Алексеевич** кандидат технических наук,  
доцент кафедры Безопасности производств, Федерального  
государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Санкт-Петербургский горный  
университет императрицы Екатерины II» (г. Санкт-Петербург)

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное казенное учреждение  
дополнительного профессионального образования  
«Национальный аэромобильный спасательный учебно-  
тренировочный центр подготовки горноспасателей и  
шахтеров»** (г. Новокузнецк)

Защита диссертации состоится «6» февраля 2025 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «ГИ УрО РАН» и на сайте <https://permisc.ru>.

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

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

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

Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02

E-mail: lserg@mi-perm.ru

Ученый секретарь диссертационного совета  
канд. техн. наук



Лобанов С.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

В последние десятилетия в горнодобывающей промышленности в России и за рубежом проявляется тенденция, связанная с увеличением мощности добычи полезных ископаемых. При этом запасы легкодоступных ресурсов истощаются и это в свою очередь приводит к увеличению глубины ведения горных работ и расширению шахтных полей. Вентиляционные сети в данных условиях становятся более разветвленными и протяженными, с постоянно изменяющейся топологией, которая обусловлена появлением новых горных выработок и вывода существующих из разряда действующих. В данных реалиях наращивание объемов добычи или поддержание их на текущем уровне невозможно без применения высокопроизводительного оборудования. Горнодобывающими предприятиями приобретаются автосамосвалы, погрузочно-доставочные комплексы и всевозможная вспомогательная техника, оснащенная двигателями внутреннего сгорания, работающими на дизельном топливе. Совместно с протяженностью горных выработок растет и длина транспортных конвейеров. В дополнение к этому работа всего оборудования подземных горных выработок невозможна без электрической энергии. Помимо увеличения протяженности электрических сетей, значительно возрастает и нагрузка на них. Совокупность этих факторов, с дополнением человеческого фактора, значительно увеличивает возможность возникновения аварийной ситуации в подземной части предприятия, связанной с возгоранием. Согласно статистическим данным около 66% от общего числа аварийных ситуаций, приводящих к существенным экономическим, социальным и экологическим последствиям, составили подземные пожары. В период с 1980 по 2023 год было зафиксировано 93 пожара в шахтах и рудниках.

Основная опасность при подземном пожаре для системы вентиляции шахты – это изменение режима проветривания и соответственно - изменение направления распространения продуктов горения по горным выработкам. В практике ликвидации подземных пожаров вопросы управления вентиляцией имеют большое значение. Они направлены на обеспечение безопасной эвакуации людей, застигнутых в шахте аварией, и успешной ликвидации ее. На выбор того или иного аварийного вентиляционного режима существенное влияние оказывает тепловая депрессия пожара, противодействие которой может привести не только к опрокидыванию вентиляционной струи, но и загазированию горных выработок продуктами горения и осложнить локализацию и ликвидацию подземного пожара. В результате возникновения пожара возможно изменение скорости и направления проветривания части вентиляционной сети или создание неустойчивого движения воздуха в отдельных выработках. Корректировка режима проветривания в случае аварийного режима производится на основании решений, принятых сотрудниками пылевентиляционных служб шахт и рудников. Исследование устойчивости проветривания при пожаре проверяется на стадии проектирования подземной части шахты. При этом анализ больших разветвленных сетей в условиях сложных, постоянно изменяющихся топологий вентиляционных сетей, а также учет всех возможных сценариев появления и развития подземного пожара является трудоемким процессом, который требует больших затрат по времени и является практически невозможным для ручного расчета без использования современных высокопроизводительных компьютеров. Это приводит к необходимости

разработки автоматизированных расчетных алгоритмов, позволяющих проводить расчеты влияния тепловой депрессии на проветривание всех горных выработок для шахтных вентиляционных сетей произвольной геометрии.

Анализ вентиляционных сетей с помощью специализированных программных продуктов требуется действующей нормативной документацией и является обязательной частью при составлении плана мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий и проектированию систем вентиляции шахт и рудников. В настоящее время для проведения расчетов аварийных режимов проветривания все более широкое применение находят отечественные и зарубежные программные комплексы, к наиболее известным из которых относятся: «Аэросеть», «Вентиляция 2.0», «VentSim» и «MFire».

Исследованием влияния тепловых депрессий от аварийных источников тепловыделения на устойчивость проветривания наклонных горных выработок начиная с середины XX века занималось большое количество ученых: Скочинский Александр Александрович, Ушаков Ким Захарович, Болбат Иван Ефимович, Гендлер Семен Григорьевич, Палеев Дмитрий Юрьевич, Булгаков Юрий Федорович, Шалимов Андрей Владимирович. Среди зарубежных коллег данным вопросом занимались: M.J. McPherson, H. Ingason, D.J Brake, A. Lönnemark, R. Hansen. Но в работах вышеперечисленных авторов отсутствует описание комплексного подхода к определению критериев устойчивости проветривания наклонных горных выработок, который учитывал бы параметры как самой наклонной выработки и характеристики источника тепловыделения, так и особенности воздухораспределения в вентиляционной сети всей шахты применительно к реализации данного подхода при решении задач воздухораспределения в одномерной сетевой постановке.

На основании вышеизложенного, разработка комплексного подхода к определению критериев устойчивого проветривания при пожаре в наклонных выработках и сокращение времени, затрачиваемого на расчет воздухораспределения в случае аварийной ситуации, является актуальным вопросом в данной области.

### **Цель работы**

Разработка алгоритма расчета воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях с учетом тепловых депрессий подземных пожаров.

### **Основная идея работы**

Использование аппроксимирующих выражений, полученных из экспериментальных исследований на разработанном стенде и многопараметрического численного трехмерного моделирования, учитывающих пространственно-временную динамику неоднородных конвективных потоков воздуха в наклонных горных выработках при пожарах в одномерном сетевом алгоритме расчета воздухораспределения.

### **Основные задачи работы**

1. Спроектировать и реализовать испытательный стенд, имитирующий наклонную горную выработку с интенсивным источником тепловыделения.
2. Разработать программу натурных измерений аэротермодинамических параметров воздушного потока на испытательном стенде.

3. Разработать, параметризовать и валидировать трехмерную численную модель наклонной горной выработки с интенсивным источником тепловыделения.

4. Провести многопараметрическое моделирование процессов тепломассопереноса в наклонной выработке с пожаром в зависимости от источников тепловыделения различной мощности и аэродинамических параметров горной выработки.

5. Определить критерии устойчивости проветривания наклонной горной выработки и определить их зависимость от начальных условий проветривания, от различных источников тепловыделения и аэродинамических параметров наклонной выработки.

6. Разработать методику одномерного сетевого расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях произвольной топологии с учетом тепловой депрессии интенсивного источника тепловыделения.

**Методы исследований** предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, лабораторные исследования влияния тепловых депрессий на процессы тепломассопереноса в горных выработках, статистическую обработку экспериментальных данных, одномерное и трехмерное численное моделирование процессов тепломассопереноса, а также обработку и сравнительный анализ результатов моделирования при различных входных параметрах задачи, анализ функциональных зависимостей различных параметров задачи друг от друга.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Трехмерная модель конвективного движения воздушных потоков в наклонной горной выработке, учитывающая тепловыделение от источника при различном начальном перепаде давления, откалиброванная по данным экспериментов на разработанном лабораторном стенде, позволяет исследовать закономерности тепломассопереноса в рудничной атмосфере наклонных горных выработках в аварийных режимах проветривания при возникновении пожаров.

2. Определены зависимости плотности и расхода воздуха в наклонной горной выработке с нисходящим проветриванием от характеристики вентиляционной сети и мощности пожара, позволяющие выявить условия изменения направления движения воздуха для случая наличия интенсивного источника тепловыделения.

3. Алгоритм расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях произвольной топологии с учетом тепловой депрессии пожара в наклонной горной выработке позволяет усовершенствовать мероприятия плана ликвидации и локализации последствий аварий.

#### **Научная новизна**

– На основании многопараметрического моделирования получена регрессионная зависимость критической тепловой мощности источника тепловыделения от аэродинамических параметров горной выработки и зависимость изменения плотности воздуха в момент опрокидывания вентиляционной струи.

– Доказана возможность применения рассчитанного среднего коэффициента конвективной дисперсии, как критерия условия устойчивости движения воздушного потока.

- Доказана применимость подхода RANS к описанию процессов теплопереноса при возгораниях в наклонных выработках с нисходящим проветриванием.
- Обосновано подобие получаемых численных решений при масштабировании горной выработки в соответствии с методом Фруда в диапазоне масштабов от 1:1 до 1:10.
- Разработан метод определения эквивалентной тепловой мощности пожара для различных типов горючей нагрузки.
- Разработан и реализован алгоритм расчета стационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях произвольной топологии с учетом тепловой депрессии пожара в наклонной горной выработке.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натурных измерений, большим объемом экспериментальных исследований в лабораторных условиях, а также положительными результатами верификации и валидации разработанных моделей.

### **Практическое значение и реализация результатов работы**

Результаты работы позволяют производить расчеты устойчивости проветривания в наклонных горных выработках по фактору тепловой депрессии от пожара и, соответственно, прогнозировать распространение продуктов горения в вентиляционных сетях произвольной топологии. Предложенные алгоритмы реализованы в ПК «Аэросеть».

Полученные в работе теоретические результаты полезны при проектировании вентиляции шахтных вентиляционных сетей и разработки мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий, связанных с устойчивостью проветривания при подземных пожарах.

### **Апробация работы**

Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на:

- Ежегодных научных сессиях «ГИ УрО РАН» «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (Пермь, «ГИ УрО РАН», 2018 — 2019 гг., 2023—2024 г.,
- Международной научной школе академика К.Н. Трубецкого, 5 конференция Международной научной школы академика К. Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» 14-18 ноября 2022 г. , ИПКОН РАН, г. Москва,
- IV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей», г. Пермь, 2023 г.

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Диссертационная работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-35-90072 (Аспиранты), а также в рамках проекта «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими и аэрологическими процессами в рудничной атмосфере и массивах

горных пород при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (рег. номер НИОКТР 122012000396-6), реализуемого по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021 – 2030 годы.

### **Личный вклад автора**

При непосредственном участии автора проведена постановка задач, разработка математических моделей, анализ и обработка полученных данных, выполнение расчетов и проведение численных экспериментов, разработка научных решений и их практическая реализация, сформулированы основные научные положения и выводы.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д-ру техн. наук, чл.-корр. РАН Левину Л.Ю. за формирование научного направления работы, консультации при выполнении работы и за создание уникальной среды для исследований, д-рам техн. наук Жихареву С.Я., Зайцеву А.В., Шалимову А.В., Семину М.А. за ценные указания и помощь в разработке математических моделей. Успешной работе над диссертацией способствовала творческая, доброжелательная атмосфера в коллективе и поддержка коллег.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы подготовлено и опубликовано 16 печатных работ, в том числе 8 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК, 8 в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

### **Объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 12 таблиц. Список использованных источников состоит из 215 наименований, в том числе 101 зарубежных.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **I научное положение:**

*Трехмерная модель конвективного движения воздушных потоков в наклонной горной выработке, учитывающая тепловыделение от источника при различном начальном перепаде давления, откалиброванная по данным экспериментов на разработанном лабораторном стенде, позволяет исследовать закономерности тепломассопереноса в рудничной атмосфере наклонных горных выработках в аварийных режимах проветривания при возникновении пожаров.*

Экспериментальное исследование процессов тепломасса-переноса в наклонных горных выработках в шахтных условия практически невозможно. В первую очередь из-за стихийности процесса возникновения очага возгорания и как следствие невозможности заранее разместить измерительное оборудование в месте пожара. Во-вторых воздействие высоких температур которые характеризуют подземные пожары накладывает серьезные ограничения не только на пребывание человека в подземной части рудника но и на измерительные приборы которые могут быть использованы в ходе измерения.

Одним из инструментов позволяющих провести анализ процессов тепломассопереноса наклонной выработке при возвратных и частично-возвратных течениях, вызванных тепловой депрессией с учетом изменяемых характеристик вентиляционной сети, геометрии горной выработки и характеристик источника является трехмерное численное моделирование. Для этого была разработана трехмерная численная модель. В основе математической модели лежат усредненные по Рейнольдсу уравнение неразрывности, уравнение Навье-Стокса и уравнение энергии, записанные для трехмерного пространства – атмосферы горной выработки:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu_m + \mu_t) \nabla \mathbf{u}] + \mathbf{g} \rho, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u}(\rho e + p)] = \nabla \cdot [(\lambda + \lambda_t) \nabla T], \quad (3)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{u}$  - вектор скорости воздушного потока, м/с;  $t$  – время, с;  $p$  – давление, Па;  $\mu_m$  – молекулярная вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $\mu_t$  – турбулентная вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $\mathbf{g}$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $e$  – удельная энергия воздуха, Дж/(кг·°C);  $T$  – температура, °C;  $\lambda$  и  $\lambda_t$  – молекулярный и турбулентный коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·°C).

Для замыкания данной системы уравнений была использована гипотеза Буссинеска, которая предполагает, что турбулентная вязкость может быть представлена как скалярная величина. При этом турбулентная теплопроводность принимается пропорциональной турбулентной вязкости:

$$\mu_t = \rho \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k\sqrt{2\mathbf{S}:\mathbf{S}}}{\varepsilon}} \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4)$$

$$\lambda_t = \frac{\mu_t}{Sc_t}, \quad (5)$$

где  $k$  – турбулентная кинетическая энергия, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – диссипация турбулентной кинетической энергии, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $A_0, A_s$  – параметры модели турбулентности Realizable k-epsilon;  $\mathbf{S}$  – тензор скоростей деформации потока, 1/с;  $Sc_t$  – турбулентное число Шмидта.

Для определения параметров  $k$  и  $\varepsilon$  использовалась двухпараметрическая модель турбулентности Realizable k-epsilon, включающая в себя следующие уравнения:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b, \quad (7)$$

где  $\mu_m$  – ламинарная динамическая вязкость Па·с;  $G_b$  – генерация турбулентной кинетической энергии при наличии ненулевого гравитационного поля и градиента температуры



(генерация турбулентности из-за плавучести), которая для случая идеального газа может быть вычислена по формуле:

$$G_b = \beta \frac{\mu_t}{Pr_t} g \cdot \nabla T, \quad (8)$$

где  $\beta$  – коэффициент теплового расширения воздуха,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля.

Для получения достоверных результатов трехмерного моделирования необходима валидации модели. В рамках данного исследования валидация численной модели выполнялась с использованием экспериментальных данных, полученных на разработанном стенде, имитирующем наклонную горную выработку с источником тепловыделения.

В рамках настоящего исследования разработан лабораторный стенд, представляющий собой уменьшенную модель горной выработки и предназначенный для экспериментального исследования конвективного расслоения воздушных потоков в горизонтальных и наклонных выработках вблизи интенсивного источника тепловыделения. Схематичный вид стенда показана на рисунке 1.

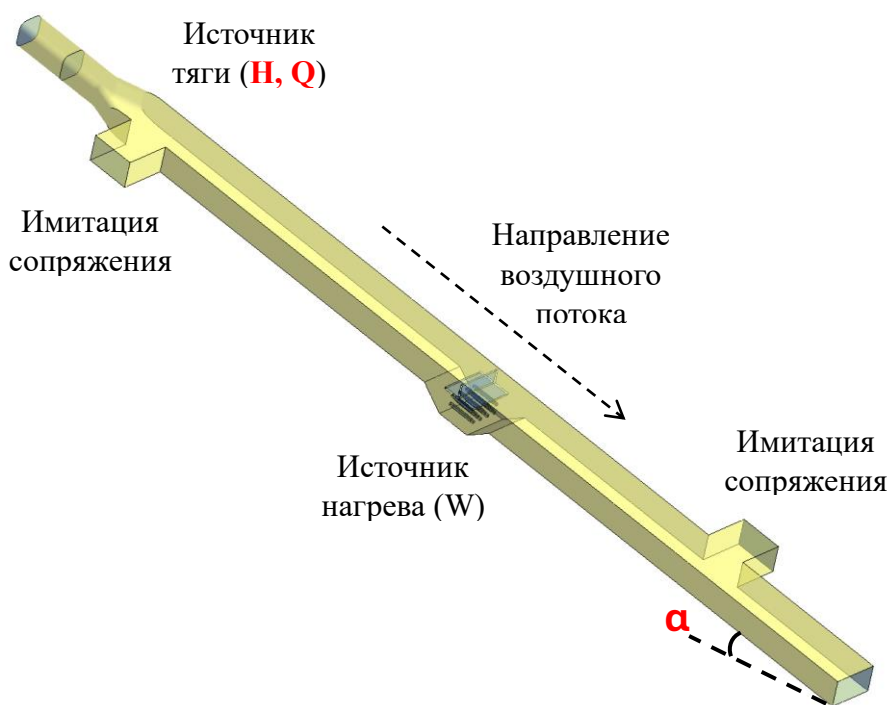


Рисунок 1 — Схематичный вид лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой стальной воздуховод, который практически на всем своем протяжении имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами  $300 \times 500$  мм. Исключениями являются малая область вблизи источника нагрева (в центральной области стенда), а также малая область вблизи источника тяги (в верхней части стенда), где сечение переходит от кругового профиля на выходе из вентилятора к прямоугольному профилю  $300 \times 500$  мм. Движение воздуха в воздуховоде обеспечивается канальным вентилятором, допускающим регулирование производительности. Фотографии собранного стенда приведены на рисунке 2. При этом средняя скорость воздушного потока в воздуховоде может изменяться в

диапазоне от 0,5 до 3,0 м/с. Также в стенде предусмотрена возможность изменения угла наклона воздуховода в диапазоне от  $-15^\circ$  до  $15^\circ$ , что примерно соответствует возможному диапазону углов наклона реальных горных выработок.



Рисунок 2 — Фотоснимки смонтированного испытательного стенда

Диапазон скоростей воздушного потока и интенсивностей тепловыделения на стенде определялись таким образом, чтобы соблюсти условия подобия процессов тепломассопереноса между лабораторным стендом и реальными условиями в шахте. Масштабирование скорости и теплового потока производилось по методу масштабирования Фруда:

$$\frac{V_{\text{ст}}}{V_{\text{ш}}} = \left( \frac{L_{\text{ст}}}{L_{\text{ш}}} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

$$\frac{W_{\text{ст}}}{W_{\text{ш}}} = \left( \frac{L_{\text{ст}}}{L_{\text{ш}}} \right)^{5/2}, \quad (10)$$

где  $V$  – скорость воздушного потока на стенде, м/с;  $W$  – тепловая мощность источника, Вт;  $L$  – характерный размер выработки, м; индексы «ст» и «ш» обозначают соответственно стенд и шахтные условия.

Если выражение (9) вытекает непосредственно из условия сохранения числа Фруда, то выражение (10) дополнительно включает в себя условие сохранения температур. Одновременно удовлетворить критериям Фруда и Рейнольдса невозможно без изменения типа исследуемой среды в лабораторном стенде. Однако для условий эксперимента параметры стенда подобраны таким образом, чтобы соблюсти диапазон чисел Рейнольдса, при котором течение воздуха в воздуховоде происходит в режиме развитой турбулентности.

На следующем этапе исследования была выполнена серия экспериментальных измерений скорости и температуры воздушного потока, а также перепада давления в рассматриваемой области необходимая для валидации модели. Эксперимент выполнялся для различных углов наклона, при различных начальных скоростях воздушного потока в условиях отключенного и работающего источника нагрева. Для проведения замеров были выделены три характерных сечения после первого ответвления, после источника нагрева и на выходе из наклонной части воздуховода. В каждом сечении измерения выполнялись в трех вертикальных плоскостях с шагом погружения измерительного прибора 5 сантиметров. Принципиальная схема точек измерения скорости и температуры приведена на рисунке 3.

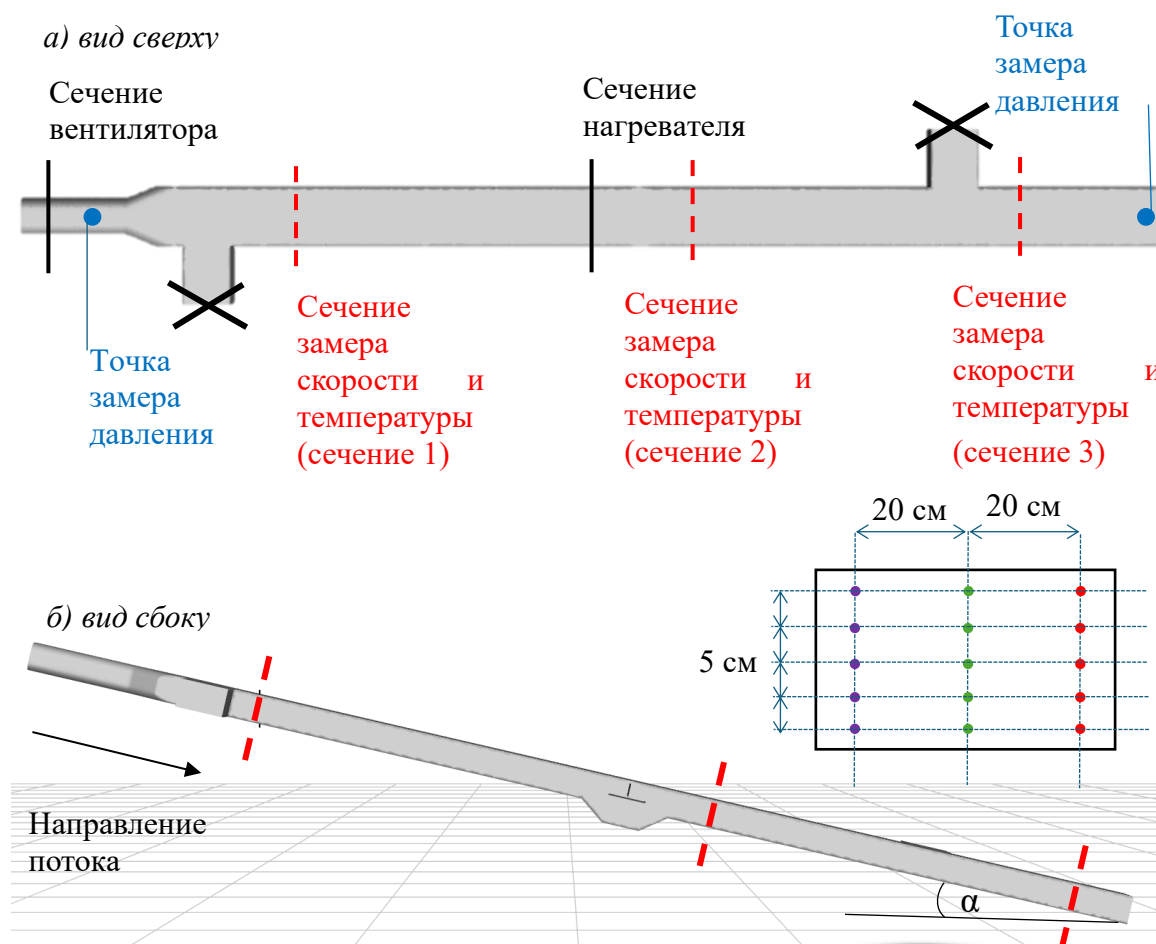


Рисунок 3— Схема расположения сечений экспериментальных измерений скорости и температуры воздушного потока в различных точках и точки измерения перепада давления на экспериментальном стенде

Валидация трехмерной численной модели осуществлялась путем сопоставления рассчитанных на модели эпюр скорости и температуры с точками, полученными в натуральных

измерениях в исследуемых сечениях. На рисунке 4 представлены теоретические кривые и экспериментальные точки для продольной компоненты скорости и температуры воздушного потока для одного из исследуемых режимов.

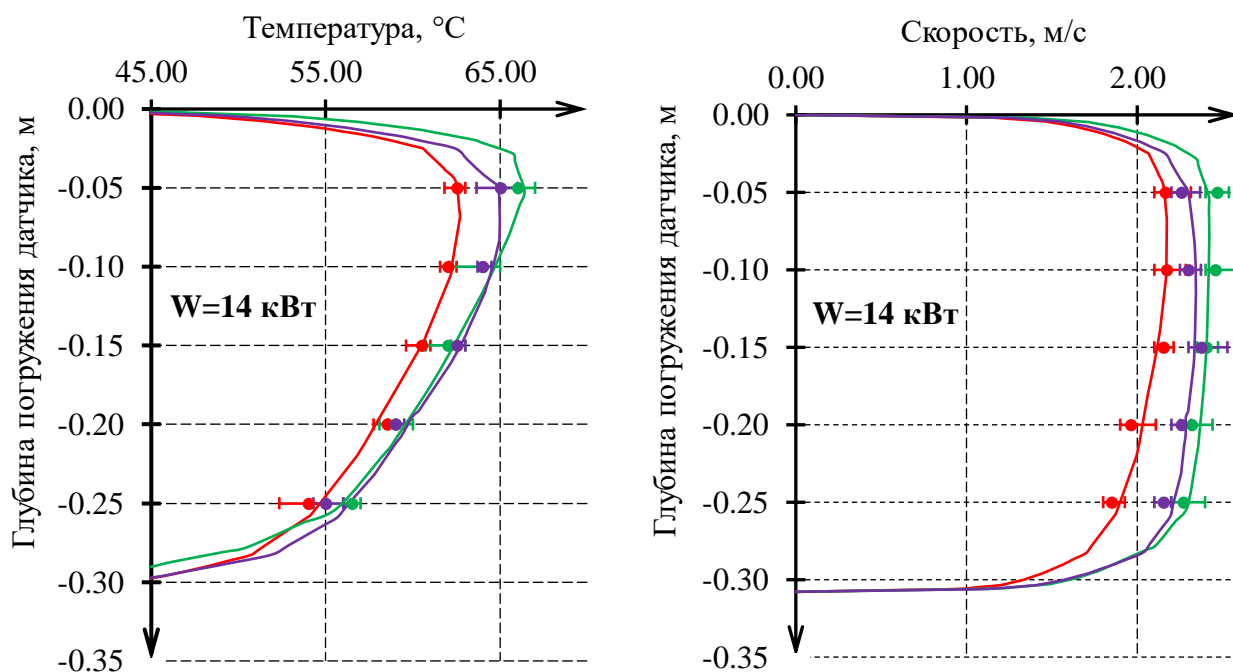


Рисунок 4— Данные натуральных измерений скорости и температуры в сравнении с математической моделью в различных точках сечения 3 при угле наклона – 13 градусов (сиреневый – левая ось, зеленый – центральная ось, красный – правая ось измерения)

Сопоставление распределений скорости и температуры воздушного потока также проводилось при других значениях мощности тепловыделений, и режимах работы вентилятора. В целом полученные данные позволяют судить о хорошем соответствии численного моделирования и лабораторного эксперимента при рассмотренном угле наклона воздуховода. Для отдельных экспериментальных точек наблюдаются несущественные количественные рассогласования с данными численного моделирования, однако в целом на качественном уровне модельные кривые и экспериментальные точки демонстрируют одинаковый характер изменения скоростей и температур воздушного потока по сечению. В обоих рассмотренных сечениях также имеет место хорошее соответствие модельных и экспериментальных данных по средним значениям скорости и температуры. Это в большей степени обеспечивается предварительной калибровкой математической модели, в то время как схожий характер отклонений исследуемых параметров потока от соответствующих средних значений уже показывает корректную работу выбранной математической модели.

## II научное положение:

*Определены зависимости плотности и расхода воздуха в наклонной горной выработке с нисходящим проветриванием от характеристики вентиляционной сети и мощности пожара, позволяющие выявить условия изменения направления движения воздуха для случая наличия интенсивного источника тепловыделения.*

На валидированной модели выполнено многопараметрическое моделирование различных сценариев аварийной ситуации с точки зрения изменения различных факторов характеризующих течение воздуха, а именно сил инерции и плавучести, а также изменение аэродинамического сопротивления сети. Для этого в модели варьировались начальный перепад давления или начальной скорости, мощность источника тепловыделения, а также положение вентиляционного клапана на выходе из стенда. Моделирование выполнялось для случая полностью открытого отверстия 1, имитирующего сопряжение наклонной горной выработки с горизонтом. Тогда с практической точки зрения рассматриваемая система соответствует ситуации параллельного соединенных горных выработок, в одной из которых имеет место пожар. Регулируя степень открытия вентиляционного клапана, задаются разные пропорции аэродинамических сопротивлений двух параллельных выработок. Тем самым исследуется влияние данного фактора на вероятность опрокидывания струи в параллельной ветви с пожаром.

Режимы вентилятора подбирались таким образом, чтобы при отсутствии источника нагрева и полностью открытом вентиляционном клапане отверстия 3 в наклонной части рассматриваемого канала обеспечивалась заданная скорость. Для исследования выбрано шесть точек по скоростям. При этом также определялся перепад давления в наклонной части стенда. Тем самым устанавливалось соответствие между перепадом давления и скоростным режимом.

Таблица 1 — Связь между скоростью воздуха в канале и перепадом давления в нем

Скорость, м/с	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50
Перепад давления, Па	0,41	1,06	3,61	7,79	13,62	21,09

Для каждого из выполненных расчетов для дальнейшего анализа формировались массивы следующих расчетных, выходных параметров:

- интегральная величина массового расхода воздуха на поверхности вентиляционного окна 1 и вентиляционного окна 3;
- интегральная величина массового расход воздуха на поверхности входа (вентиляторе);
- средняя по объему плотность воздуха для всей расчетной геометрии.

На рисунке 5 представлены полученные по итогам многопараметрического моделирования зависимости массового расхода воздуха на вентиляционном отверстии 3 от начального перепада давления, степени открытия вентиляционного клапана на выходном сечении и мощности источника тепловыделения. Положительным значениям массового расхода соответствуют ситуации опрокинувшейся струи воздуха в наклонном канале (течение воздуха снизу вверх), а отрицательным – случаю неизменного направления движения воздушной струи (течение воздуха сверху вниз).

Из рисунка видно, что при минимальном значении начального перепада давления воздушная струя опрокинута при всех рассмотренных вариантах тепловой мощности источника. Далее по мере роста начального перепада давления опрокинутый расход воздуха снижается по абсолютной величине и достигает нулевого значения. Чем меньше тепловая мощность источника тепловыделения, тем при меньшем давлении достигается точка с нулевым расходом. При последующем росте начального перепада давления массовый расход отрицателен, что говорит о



том, что в данной области параметров воздушная струя глобально не изменила направления своего движения после включения источника нагрева.

Особенностью зависимостей, представленных на рисунке 5, является примерное совпадение точек пересечения кривых, характеризующих степень открытия вентиляционного клапана № 3, с осью ординат при фиксированной мощности пожара. Это справедливо для всех рассмотренных вариантов мощностей тепловыделения (22, 33, 44 и 55 кВт). Таким образом, имеет место слабая зависимость момента опрокидывания воздушного потока от аэродинамического сопротивления последующей вентиляционной сети за окном № 3, опрокидывание воздушной струи в большей степени зависит от мощности пожара и начального перепада давления в наклонной части стенда.

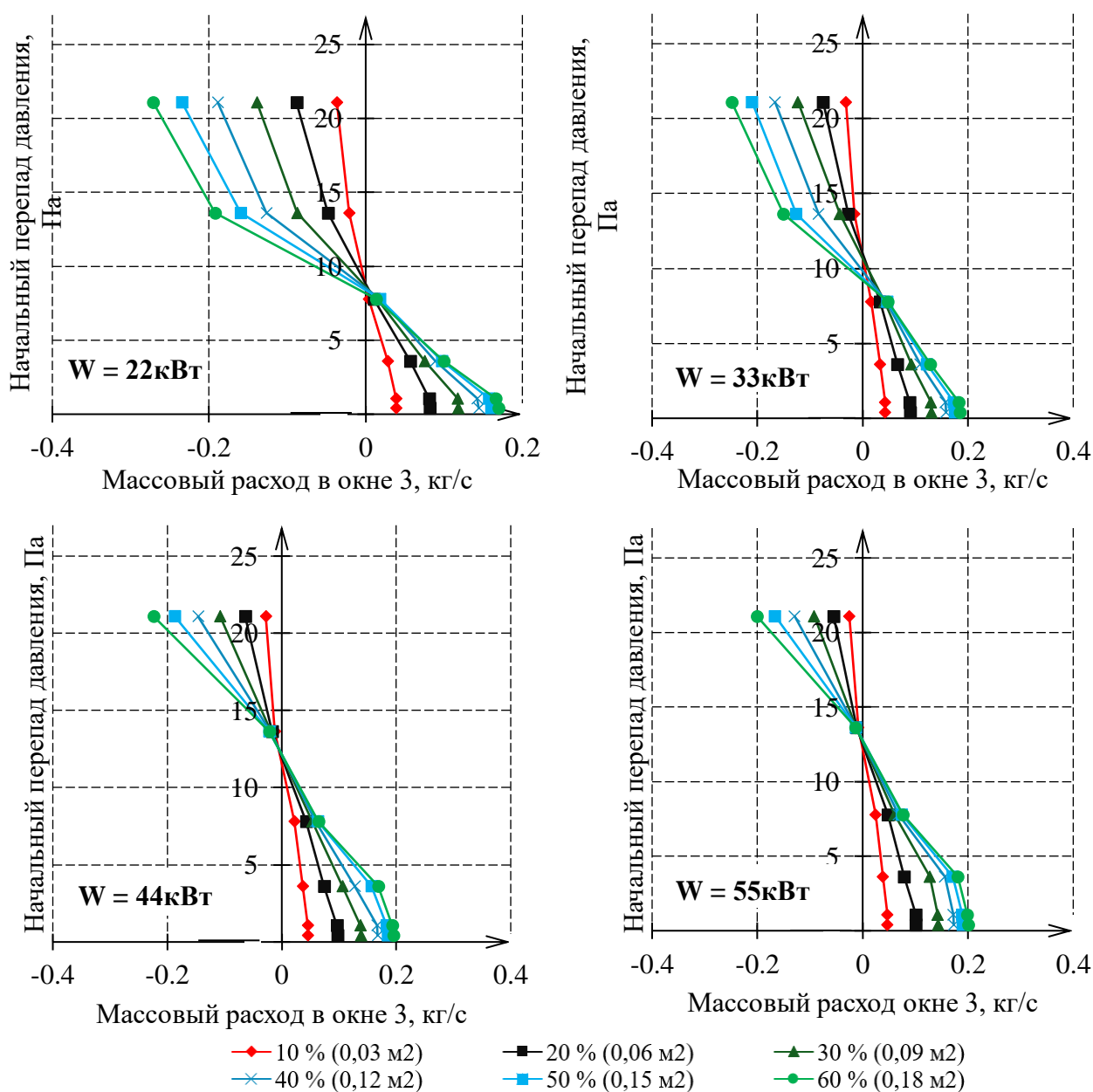


Рисунок 5 — Изменение массового расхода воздуха в отверстии 3 от начальной скорости воздушного потока (перепада давления) при различной степени его открытия

По данным многопараметрического численного моделирования для полученного массива массовых расходов на различных отверстиях экспериментального стенда построена линейная

регрессионная зависимость, предсказывающая величину массового расхода воздуха  $Q_m^{(out)}$  в выходном сечении канала отверстия 3 от трех рассмотренных варьируемых параметров задачи.

Вид линейной регрессии с размерными коэффициентами представлен ниже:

$$Q_m^{(out)} = 0,0664 - 0,0136\Delta P - 0,000136\varphi + 0,00185W, \quad (11)$$

где  $\Delta P$  – начальный перепад давления, Па;  $\varphi$  – процент открытия вентиляционного клапана, %;  $W$  – мощность источника тепловыделения, Вт.

Данная модель несмотря на свою простоту имеет два достоинства. Во-первых, она позволяет проанализировать и сравнить степень влияния каждого из факторов модели на значение прогнозируемой величины  $Q_m^{(out)}$ . А во-вторых, линейная регрессия решает основную задачу – исследовать условия опрокидывания воздушной струи в наклонном канале.

Задавшись условием  $Q_m^{(out)} = 0$ , что соответствует моменту перехода массового расхода  $Q_m^{(out)}$  из области положительных значений в область отрицательных, выразим из уравнения (11) мощность  $W$  – это будет критическая мощность пожара, при которой будет опрокидывание расхода воздуха, как функцию параметров  $\Delta P$ ,  $\varphi$ :

$$W_{cr} = -35,8 + 7,37\Delta P - 0,073\varphi. \quad (12)$$

Из этой зависимости видно, что степень открытия клапана на выходном отверстии влияет на критическую мощность слабее, чем начальный перепад давления в выработке.

Важным обстоятельством является то, что полученная зависимость (12) справедлива для условий лабораторного стенда и нуждаются в масштабировании на случай размерном реальных горных выработок. Согласно зависимостям (9), (10) при изменении линейного размера исследуемого объекта с  $L_m$  до  $L_e$  для тепловой мощности следует вводить множитель  $\left(\frac{L_e}{L_m}\right)^{2,5}$ . С учетом того, что перепад давления  $\Delta P$  является квадратичной функцией от скорости потока, для перепада давления  $\Delta P$  следует вводить множитель  $\left(\frac{L_e}{L_m}\right)$ . Параметр  $\varphi$  является относительным и для него масштабирование не предполагается. В итоге зависимость (12) приобретают вид:

$$W_{cr}^{(sc)} = -(35,8 + 0,073\varphi) \left(\frac{L_e}{L_m}\right)^{2,5} + 7,37\Delta P \left(\frac{L_e}{L_m}\right)^{1,5}, \quad (13)$$

Адаптация данной зависимости в расчетах воздухораспределения на одномерных вентиляционных сетях рудников подразумевает, что критические тепловые мощности будут входить в уравнение баланса массы для независимых контуров сети, включающих выработки с пожаром. При рассмотрении проветривания упрощенной вентиляционной сети из двух контуров, в одном из которых есть источник сильного нагрева (см. рисунок 6), можно записать такую систему уравнений:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3, \quad (14)$$

$$R_1 Q_1 |Q_1| + R_3 Q_3 |Q_3| = H(Q_1) + (\rho_3 - \rho_1)gh, \quad (15)$$

$$R_2 Q_2 |Q_2| - R_3 Q_3 |Q_3| = (\rho_3 - \rho_2)gh, \quad (16)$$

где  $Q$  – объемный расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $R$  – аэродинамическое сопротивление,  $\text{Н с}^2/\text{м}^8$ ;  $H$  – напор вентилятора, находящегося в ветви № 1, Па;  $h = z_{II} - z_{III} > 0$  – перепад высот между узлами II и III, м;  $z$  – вертикальная координата, м. Индексы при  $Q, R, \rho$  указывают на номер ветви.

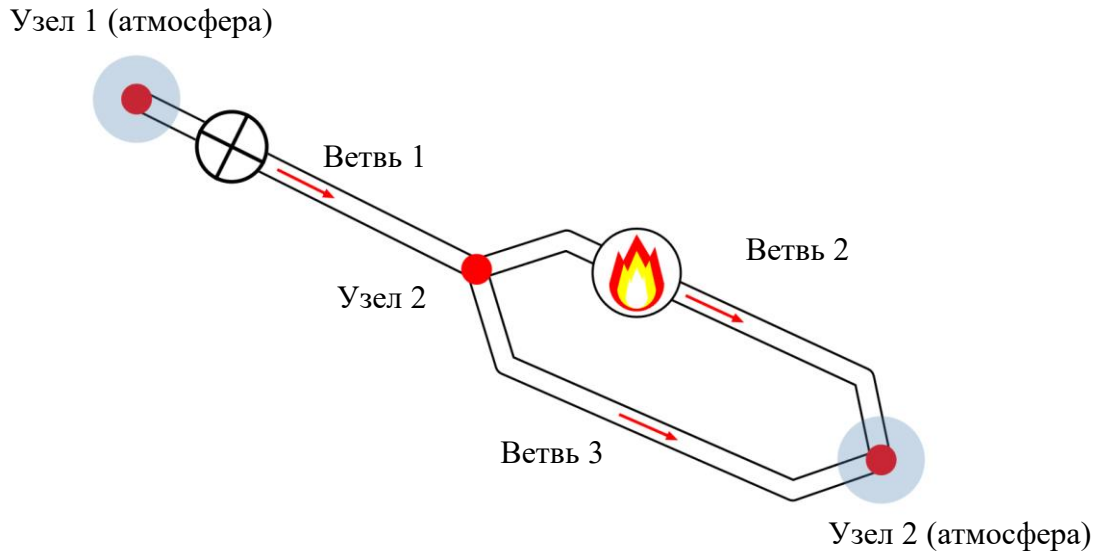


Рисунок 6 — Одномерная модель вентиляционной сети, соответствующая рассматриваемому лабораторному стенду

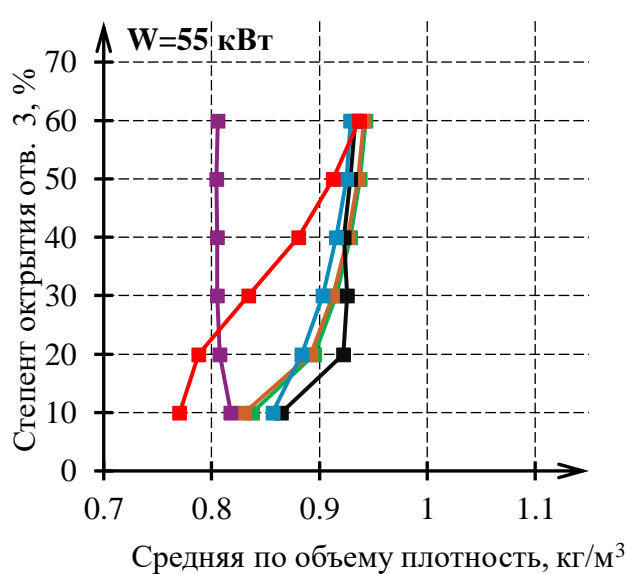
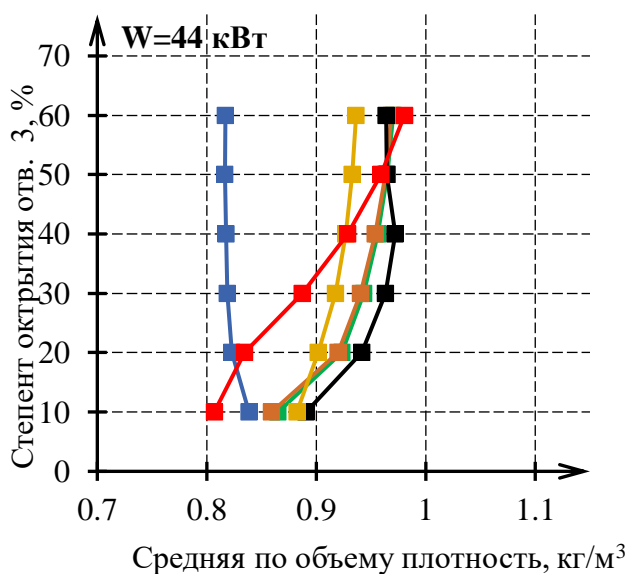
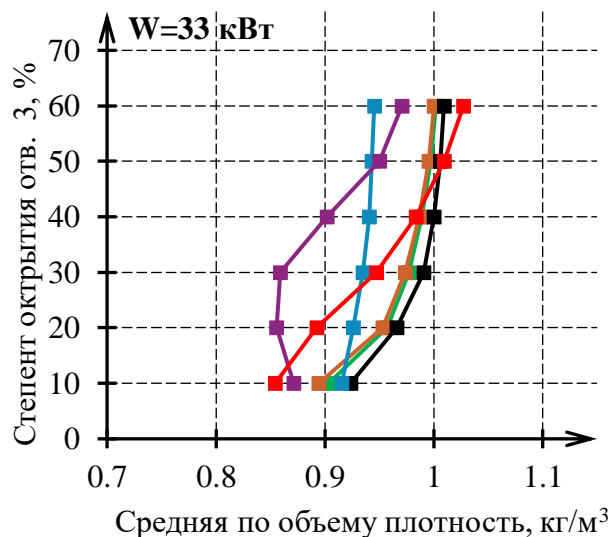
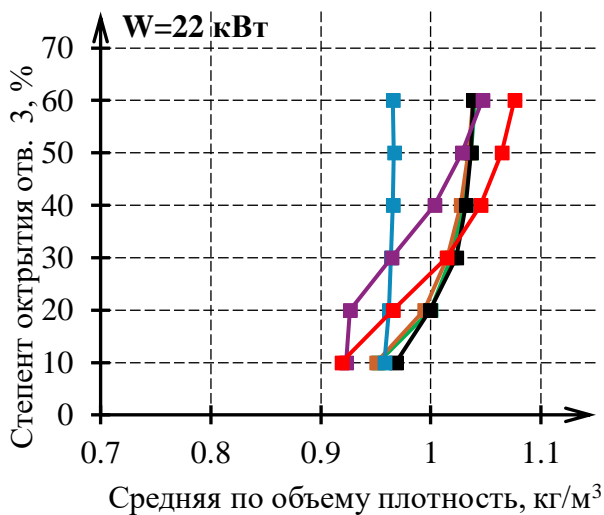
По мере увеличения тепловой мощности от источника в наклонной ветви 2 плотность воздуха в этой ветви уменьшается из-за нагрева воздуха. Приближаясь к моменту теплового запираания потока, который предшествует опрокидыванию струи воздуха, величина  $W$  будет приближаться к  $W_{cr}$ . В момент достижения  $W_{cr}$  поток в ветви № 2 должен стать равным нулю, т.е. будет справедливо:

$$\rho_2 = \frac{\rho_0 T_0}{T_0 + \frac{1}{2} \frac{W_{cr}}{\rho_0 c_p Q_2}} \rightarrow 0 \quad (24)$$

Очевидно, в рамках простой модели идеального вытеснения второе слагаемое справа в (16) устремится к нулю, если расход в знаменателе положить равным нулю. В действительности в данной ситуации вблизи источника нагрева скорость воздуха может существенно отличаться от нуля из-за действия конвекции. Также в момент движения нагретого воздуха по горный выработке происходит процесс интенсивного теплообмена с породным массивом и теплообмен с окружающим воздухом через стальные стенки для случая экспериментального стенда.

В рамках настоящей работы рассчитаны средние плотность воздуха в наклонном канале при различных мощностях тепловыделения, режимах работы вентилятора и степени открытия клапана на выходе из канала, результаты приведены на рисунке 7. С учетом того, что при нулевой тепловой мощности плотность воздуха приблизительно равна  $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ , можно сказать, что минимальная средняя плотность воздуха уменьшается с ростом критической тепловой мощности со скоростью примерно  $0,007 \text{ кг}/\text{м}^3/\text{кВт}$ .





- 0,41 Па (0,25 м/с)
- 1,06 Па (0,5 м/с)
- 3,61 Па (1 м/с)
- 7,79 Па (1,5 м/с)
- 13,62 Па (2 м/с)
- 21,09 Па (2,5 м/с)

Рисунок 7 — Зависимость средней плотности воздуха по объему от степени открытия вентиляционного клапана отверстия три при различной мощности источника тепловыделения

Тогда с учетом закона подобия выражение для расчета плотности может быть записано в следующем виде:

$$\rho_2 = \rho_0 - 7 \cdot W \cdot \left(\frac{L_{ст}}{L_{ш}}\right)^{2,5} = \rho_0 - 0,6 \cdot \frac{W}{L_{ш}^{2,5}}, \quad (17)$$

где  $W$  — мощность источника нагрева, МВт;  $L$  — характерный размер, м.

Однако следует отметить, что данное выражение справедливо только для случаев движения воздушного потока в режиме близком к опрокидыванию.

Для оценки соответствия процессов тепломассопереноса, протекающих в наклонном испытательном стенде и в горных выработках при наличии источника интенсивного нагрева, с учетом принятых критериев подобия выполнена серия численных расчетов. Для этого изначальная расчетная геометрия испытательного стенда была увеличена до размеров реальной

горной выработки характерных для медно-никелевых и алмазных рудников. Принятые для расчета поперечные размеры сечения составили 5 м по почве горной выработки и 3 м в высоту, что соответствует площади поперечного сечения 15 м<sup>2</sup>. Все продольные размеры расчетной геометрии также увеличены в 10 раз. Суммарная протяжённость расчетной геометрии составила 125 м.

Для всех ранее рассмотренных мощностей источника тепловыделения (22 кВт - 55 кВт) при начальном значении перепада давления 7,8 Па (начальной скорости 1,5 м/с) в наклонном участке системы воздухопроводов наблюдалось изменение направления движения воздушного потока, при этом при начальном значении перепада давления 13,6 Па (начальной скорости 2 м/с) нисходящее направление движения воздушного потока сохранялось. При этом рассматриваемом диапазоне значений находится критическое значение начального перепада давления при котором при фиксированной мощности источника тепловыделения движение воздушного потока становится неустойчивым. Таким образом данные расчетные точки были выбраны в качестве начальных параметров для расчета параметров проветривания наклонной горной выработки реального размера.

Для полученных результатов расчета для случая угла наклона  $-13^\circ$  были определены значения критического значения начального перепада давления при котором достигается неустойчивость движения воздуха. Зависимость полученных значений критического начального перепада давления от мощности источника тепловыделения представлены на рисунке 8. Где по оси абсцисс и ординат откладываются мощность и давление соответственно, масштабированные относительно характерного размера  $L_0$  по предложенным формулам метода Фруда.

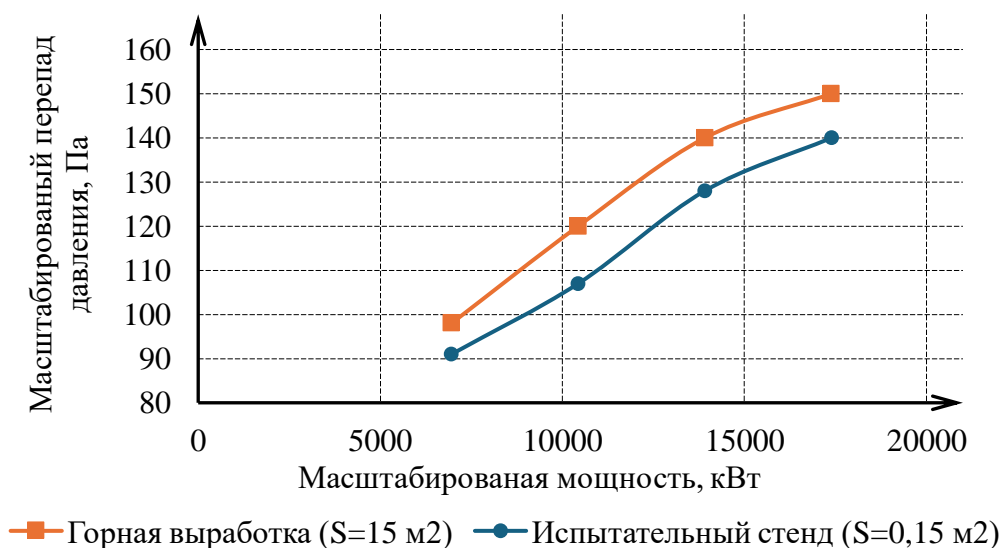


Рисунок 8 — Зависимость критического перепада давления от мощности источника тепловыделения для испытательного стенда и горной выработки

Максимальное расхождение критического перепада давления составляет 9 %, а среднее значение расхождения 7,8 %, что говорит о возможности масштабирования полученных зависимостей с учетом принятых критериев подобия.

### III научное положение:

*Алгоритм расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях произвольной топологии с учетом тепловой депрессии пожара в наклонной горной выработке позволяет совершенствовать мероприятия плана ликвидации и локализации последствий аварий.*

В результате возникновения пожара возможно изменение режима проветривания части вентиляционной сети или создание неустойчивого режима движения воздуха в отдельных выработках. Корректировка режима проветривания в случае аварийного режима производится на основании решений, принятых сотрудниками пылевентиляционных служб шахт и рудников, также исследование устойчивости проветривания при пожаре проверяется на стадии проектирования подземной части шахты или рудника. При этом анализ больших разветвленных сетей в условиях сложных постоянно изменяющихся топологий вентиляционных сетей является трудоемким процессом, который требует больших затрат времени и является практически невозможным для ручного расчета без использования современных электронно-вычислительных механизмов. Таким образом, возникает необходимость разработки алгоритма позволяющего производить оценку устойчивости проветривания вентиляционных сетей сложной топологии при наличии интенсивных источников тепловыделения

С момента возникновения пожара на проветривание горной выработки с нисходящим потоком оказывает влияние тепловая депрессия, обусловленная разницей температур. Влияние тепловой депрессии можно заменить действием дополнительного источника тяги с характеристикой, заданной в координатах  $h-Q$  в виде прямой параллельной оси абсцисс для каждого момента времени. При этом действие тепловой депрессии, условного источника тяги противоположно направленно напору главной вентиляторной установки для данной выработки.

Уравнения баланса массы, импульса и энергии, с помощью которых осуществляется стационарный расчет распределения аэро- и термодинамических параметров в вентиляционной сети (I и II законы Кирхгоффа), представлены ниже:

$$\sum_{i \in A_j} Q_i I_{ij} = 0, \quad (18)$$

$$\sum_{i \in C_k} (R_i Q_i |Q_i| - H_i - \rho_i (T_i) g \Delta h_i) = 0, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} T_i^{(out)} &= T_i^{(in)} + \Delta T_i = \\ &= T_i^{(in)} + \frac{W}{\rho_i c_i Q_i} + \left( T_w - T_i^{(in)} - \frac{W}{\rho_i c_i Q_i} \right) \cdot (1 - A_i). \end{aligned} \quad (20)$$

Здесь индексы  $i, j$  и  $k$  нумеруют ребра, вершины и независимые контуры графа соответственно;  $I$  — матрица инцидентности графа;  $\Delta h_i$  — перепад высот (по вертикальной координате  $z$ ) ребра графа, м;  $T_i^{(in)}$  — температура воздуха на входе в ребро (горную выработку) №  $i$ , °C;  $T_i^{(out)}$  — температура воздуха на выходе из ребра (горной выработки) №  $i$ , °C;  $T_w$  — температура стенки горной выработки №  $i$ , °C; безразмерный параметр  $A_i$  определяется по формуле:

$$A_i = \exp\left(-\frac{\alpha_i P_i L_i}{\rho_i c_i Q_i}\right). \quad (21)$$

Эта функция характеризует долю теплового влияния начальной температуры воздуха в выработке  $T_i^{(in)}$  на значение температуры воздуха в конце горной выработки.

Следует отметить, что задача решается итерационно. Это связано с тем, что при расчете распределения температур в выработках вентиляционной сети по рассчитанному ранее распределению расходов воздуха, изменяются величины тепловых депрессий в контурах вентиляционной сети. Это в свою очередь приводит к необходимости пересчета распределения расходов воздуха и температурных полей.

Предполагается, что средняя плотность воздуха в горной выработке зависит от средней температуры воздуха  $\bar{T}_i$  в этой выработке согласно формуле:

$$\bar{\rho}_i(\bar{T}_i) = \frac{\bar{p}_i}{R_g(\bar{T}_i + 273,15)}, \quad (22)$$

где  $p_i$  — среднее абсолютное давление в выработке, Па;  $R$  — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·°С).

При этом на каждой итерации расчета проводится проверка условия выбора максимальной рассчитанной плотности по ранее полученному выражению характеризующему режим проветривания близкий к опрокидыванию (17) и выражению (22), которая и принимается к дальнейшему расчету.

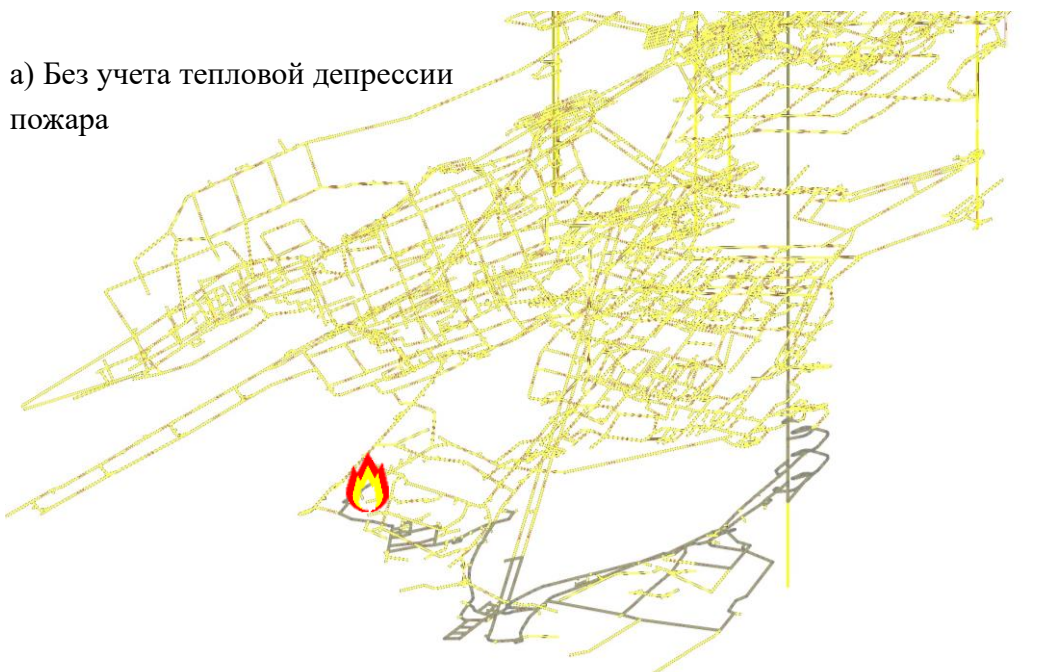
Численное решение задачи реализовано в программном модуле аналитического комплекса «АэроСеть», разрабатываемого сотрудниками Горного института УрО РАН. Численный расчет стационарного воздухораспределения на вентиляционной сети шахты производится методом контурных расходов. Расчет начального распределения температуры до момента возникновения пожара производится с помощью модели идеального вытеснения, реализованной на базе метода конечных разностей. Также кроме быстроты проведения расчета аварийного режима большое внимание при разработке данного инструментария уделялось простоте анализа и наглядности расчетов по следующим направлениям:

- распределение расходов воздуха, в том числе продуктов горения;
- распределение температур воздуха;
- распространение продуктов сгорания;
- распределение перепадов давления.

При расчете распространения продуктов сгорания используется модель идеального вытеснения, в которой изменение концентрации примеси в точке пространства осуществляется только за счет ее конвективного переноса, а диффузионная составляющая не учитывается ввиду ее малой величины.

Для апробации работы алгоритма выполнен расчет устойчивости проветривания для одной из наклонных горных выработок с нисходящим проветриванием рудника «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель». В качестве мощности источника тепловыделения принята фиксированная величина 15 МВт, что соответствует тепловыделению, которое может наблюдаться продолжительный промежуток времени при сгорании погрузоудоставочной машины.

Результаты распространения продуктов горения по горным выработкам рудника с тепловой депрессии пожара (б) и без учета тепловыделения (а) через 60 минут после возгорания приведено на рисунке 9.



б) С учетом тепловой депрессии пожара



Рисунок 9 — Распространение продуктов горения по горным выработкам рудника «Таймырский» с учетом тепловой депрессии пожара (б) и без учета тепловыделения (а)

Выбранная топология вентиляционной сети рудника, состоит из 3575 расчетной ветви. Конечные установившийся режим проветривания был найден за 26 итераций расчета воздухораспределения с учетом влияния тепловой депрессии пожара. При этом суммарное время

расчета аварийного режима проветривания составило 17 секунд. По результатам моделирования сделан вывод о том, что при принятой для расчета тепловой мощности источника тепловыделения 15 МВт, происходит изменение направления движения воздушного потока. Как следствие, в случае опрокидывания воздушного потока в наклонной горной выработке происходит изменение направление распространения продуктов горения во всей вентиляционной сети.

Информация, полученная в результате расчета стационарного воздухораспределения с учетом тепловыделения пожара в наклонной выработке, может быть полезна на стадии составления оперативной части плана по локализации и ликвидации последствий аварий, а также корректировки уже принятых решений в случае возникновения аварийной ситуации, с точки зрения определения оптимального пути подхода спасателей и вывода горнорабочих с небезопасного участка шахты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научно-практической задачи определения устойчивости проветривания наклонных горных выработок с учетом тепловой депрессии пожара в аварийных режимах проветривания рудников и получены следующие основные научные результаты:

1. Спроектирован и изготовлен испытательный аэродинамический стенд, представляющий собой физическую модель наклонной горной выработки с интенсивным источником тепловыделения рудника (шахты), имеющей сопряжения с двумя горизонтами, который позволяет проводить натурное моделирование режимов вентиляции в аварийной ситуации;

2. Для смонтированного экспериментального стенда по разработанной методике выполнен ряд измерений полей скоростей и температур в характерных сечениях экспериментального стенда.

3. Полученные результаты экспериментального исследования использованы для валидации и параметризации разработанной математической модели тепломассопереноса в наклонном канале в трехмерной постановке с использованием модели турбулентности Realizable  $k$ - $\epsilon$ .

4. Выполнено многопараметрическое моделирование течения воздуха в наклонной выработке при различных тепловых мощностях источника возгорания, режимах работы вентилятора (перепадах давления) и аэродинамических сопротивлениях горной выработки.

5. Получена, в результате обработки и обобщения данных трехмерного численного моделирования, линейная регрессионная зависимость массового расхода воздуха в наклонной горной выработке при пожаре от различных начальных параметров проветривания. Регрессионная зависимость использована для определения зависимости критической тепловой мощности источника нагрева от аэродинамических параметров горной выработки при нисходящем проветривании.

6. Получена зависимость изменения плотности воздуха для неустойчивого режима проветривания наклонной выработки в момент опрокидывания вентиляционной струи. Доказана

возможность применения рассчитанного среднего коэффициента конвективной дисперсии как критерия устойчивости движения воздушного потока.

7. Разработана методика одномерного сетевого расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях произвольной топологии с учетом тепловой депрессии интенсивного источника тепловыделения, которая реализована в ПК «Аэросеть».

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

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

1. Попов М. Д., Гришин Е. Л., Жихарев С. Я., Шалимов А. В. Оценка рисков последовательного проветривания при вскрытии месторождения наклонными съездами // Горный журнал. – 2023. – №11. – С.49–56. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.08.
2. Пересторонин М. О., Паршаков О. С., Попов М. Д. Параметризация модели вентиляционной сети при анализе аварийных режимов проветривания систем горных выработок // Горные науки и технологии. – 2023. – Т. 8. – №2. – С. 150–161. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-10-13.
3. Левин Л. Ю., Попов М. Д., Кормщиков Д. С., Зайцев А. В. Моделирование систем пожаро-оросительных трубопроводов горнодобывающих предприятий в аналитическом комплексе «АэроСеть» // Горный журнал. – 2021. – №7. – С. 85–90. DOI: 10.17580/gzh.2021.07.15.
4. Попов М. Д., Кормщиков Д. С., Семин М. А., Левин Л. Ю. Расчёт устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «АэроСеть» // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – №10. – С. 24–32. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-24-32.
5. Попов М. Д., Семин М. А., Левин Л. Ю. Анализ воздухораспределения в наклонной горной выработке при наличии интенсивного источника тепловыделения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – 2024. – №4. DOI: 10.15372/FTPRPI20240412
6. Левин Л.Ю., Семин М.А., Попов М.Д., Жихарев С.Я. Валидация модели тепломассопереноса в атмосфере горизонтальной горной выработки при наличии интенсивного источника нагрева // Недропользование – 2024. – Т. 24. – № 3. – С. 169-176. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.3.8
7. Шалимов А.В., Попов М.Д. Определение показателя конвективной устойчивости воздуха в стволах при нулевом режиме вентиляции рудника // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024 (**принято в печать**)
8. Levin L., Popov M., Semin M., Zhikharev S. Experimental and Numerical Study of Air Flow Reversal Induced by Fire in an Inclined Mine Working // Applied Sciences. – 2024 – Т. 14. – №. 15 P.6840. DOI: 10.3390/app14156840

**Публикации в других изданиях**

9. Попов М. Д. Анализ методов и подходов к моделированию интенсивных источников тепловыделения в наклонных горных выработках // Горное эхо. – №3 (92) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2023. – С. 128–134. DOI: 10.7242/echo.2023.3.18.
10. Шалимов А. В., Попов М. Д. Влияние тепловых факторов на величину аэродинамического сопротивления горной выработки // Горное эхо. – №3 (92) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2023. – С.142–148. DOI: 10.7242/echo.2023.3.20.
11. Попов М. Д., Таций А. В. Расчёт мощности тепловыделений при распределенных и точечных пожарах в рудничных вентиляционных сетях // Горное эхо. – №3 (88) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2022. – С.98–104. DOI: 10.7242/echo.2022.3.16.
12. Попов М. Д., Кормщиков Д. С. Гидравлический расчёт противопожарных трубопроводов в аналитическом комплексе «АэроСеть» // Горное эхо. – №2 (83) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2021. – С. 99–106. DOI: 10.7242/echo.2021.2.19.



13. Попов М. Д., Кормщиков Д. С. Расчёт опрокидывания воздушной струи в вертикальных и наклонных горных выработках при пожаре по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «АэроСеть» // Горное эхо. – №1 (78) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2020. – С. 84–89. DOI: 10.7242/echo.2020.1.18.
14. Кормщиков Д. С., Попов М. Д. Нормализация теплового режима глубоких залежей рудника «Таймырский» до момента ввода системы кондиционирования // Горное эхо. – №2 (75) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2019. – С. 84–89. DOI: 10.7242/echo.2019.2.22.
15. Попов М.Д. Исследование применимости одномерного подхода к расчету воздухораспределения в наклонных горных выработках при наличии тепловой депрессии пожара // Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей. Материалы IV Международной научно-практической конференции / Пермь, 2023 – С. 252-263.
16. Попов М. Д. Разработка методики расчёта устойчивости проветривания рудников в аварийных ситуациях, связанных с наличием тепловых депрессий // Горное эхо. – №2 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2024. – С. 80–86. DOI: 10.7242/echo.2024.2.15.

---

Сдано в печать \_\_\_\_\_ 2024 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А