

На правах рукописи

Борисовский Иван Анатольевич



**АЭРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
КОМБИНИРОВАННЫХ СХЕМ ПРОВЕТРИВАНИЯ
ГЛУБОКИХ ЗОЛОТОРУДНЫХ КАРЬЕРОВ
АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ**

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

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

Санкт-Петербург – 2023

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Гендлер Семен Григорьевич

Официальные оппоненты:

Козырев Сергей Александрович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт КНЦ РАН, лаборатория технологических процессов при добыче полезных ископаемых, заведующий;

Кобылкин Сергей Сергеевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Горный институт, кафедра безопасности и экологии горного производства, профессор.

Ведущая организация: «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

Защита диссертации состоится **21 июня 2023 года в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на веб-сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 21 апреля 2023 г.

УЧЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Один из трендов развития золотодобывающей отрасли в Арктической зоне России является приоритетное использование открытой разработки месторождений. Наряду с положительными сторонами открытого способа разработки: повышение производительности добычных работ при одновременном уменьшении их себестоимости, его широкое применение приводит к снижению экологической и аэрологической безопасности. Основными источниками, обуславливающими эти последствия, следует считать технологические операции при ведении горных работ, главным образом, рыхление породного массива и последующая транспортировка горной массы на поверхность, результатом которых является образование загрязняющих вещества: вредных газов и пыли. Эти вещества могут вначале накапливаться в карьерном воздухе, ухудшая условия труда горнорабочих, а затем выноситься за пределы карьерного пространства, оказывая негативное влияние на окружающую среду. Необходимым условием выбора схемы проветривания карьерного пространства является недопущение превышения предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ в рабочих зонах и ограничение их выноса в окружающую среду, что достигается за счет превентивного аэродинамического воздействия на области, потенциально опасные для их накопления. Реализация этого условия позволит обеспечить нормативные параметры воздуха в рабочих зонах и предотвратить «залповые выбросы» загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

На начальных этапах развития карьера пространственное распределение поступающих в воздушную среду загрязняющих веществ зависит от естественной вентиляции, определяемой действием ветрового напора, за счет которого формируется воздушный поток, пересекающий карьерное пространство и обеспечивающий вынос за границы карьера всего объема загрязнённого воздуха. С увеличением глубины выработанного пространства эффективность действия естественного способа проветривания снижается, что приводит к образованию, так называемых, зон рециркуляционного движения воздуха, в которых накапливаются вредные и загрязняющие веще-

ства, концентрация которых с течением времени может превысить предельно допустимые значения.

В климатических условиях Арктической зоны области рециркуляции приурочены к объемам карьерного пространства, в которых температурный градиент имеет отрицательное значение, что связано с поступлением в карьер атмосферного воздуха, температура которого непрерывно изменяется в течение суток, недели, месяца.

В этой связи, обязательным условием на стадии проектирования горных работ должна быть оценка аэродинамической ситуации на каждом этапе отработки месторождения для выявления областей карьерного пространства, потенциально опасных для накопления загрязняющих веществ, и обоснование эффективных способов своевременного разрушения этих зон.

Таким образом, разработка способов управления проветриванием глубоких золоторудных карьеров является актуальной задачей, решение которой позволит повысить экологическую и аэрологическую безопасность при освоении минеральных ресурсов Арктической зоны России.

Степень разработанности темы исследования

Исследованием методов нормализации параметров атмосферного воздуха за счет интенсификации естественного проветривания карьерного пространства занимались многие отечественные и зарубежные ученые, среди которых следует выделить Битколова Н.З., Рогалева В.А., Коркина Ю.М., Заслова В.Я., Тарасова В.Н., Филатова С.С., Макарова В.Н., Нестеренко Г.Ф., Морина А.С., Блонского М.В., Ледермана А.И., Гущина В.З., Мосинец В.Н., Лукьянова А.Н., Аверкина П.А., Raj K.V., Ginoux P., Chin M., Tegen I., Prospero J. M., Holben B., Dubovil O., Lin S. J., Sidney C. J. и других.

Эмпирико-аналитические методы, разработанные в работах вышеперечисленных ученых, позволяют осуществить определенную оценку аэрологических условий, формирующихся в процессе открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Вместе с тем, эти методы охватывают ограниченный диапазон условий и не учитывают сочетанное влияние метеорологических, орографических и технологических факторов на формирование аэродинамических процессов в карьерах, расположенных в Арктической зоне. В ре-

зультате аналитический подход позволяет получить решение для конкретного аэрологического условия, в случае же необходимости получения более точного результата с учетом множественного количества факторов необходимо использовать методы численного моделирования. Подходы к оценке формирования аэродинамических процессов внутри границ карьерного пространства в рамках численного моделирования рассмотрены в работах Ястребовой К.Н., Козырева С.А., Амосова П.В., Драгунского О.Н., Бакланова А.А., Гридиной Е.Б., Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. и других.

В большинстве случаев, в работах упомянутых выше исследователей, решение задачи получено в двухмерной постановке, что не дает возможности в полной мере исследовать пространственную динамику процессов формирования скоростных и температурных полей в карьерном пространстве. Это, в свою очередь, не позволяет с достаточной для практических целей точностью установить расположение и объем зон рециркуляции, что необходимо для разработки превентивных мероприятий, направленных на предотвращение накопления загрязняющих веществ.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности** по пункту 11. Гидро-, аэро-, газо- и термодинамические процессы, методы и средства управления ими в массивах горных пород и грунтов, горных выработках и выработанном пространстве.

Объект исследования. Скоростные и температурные параметры воздушной среды внутри границ карьерного пространства золоторудного месторождения района Крайнего Севера.

Предмет исследования. Аэротермодинамические процессы, имеющие место при естественном и искусственном проветривании карьерного пространства после проведения различных технологических процессов связанных с выбросом загрязняющих веществ.

Цель работы. Предотвращение процесса накопления вредных газов и пыли в глубоких золоторудных карьерах, расположенных в Арктической зоне.

Идея работы. Для достижения поставленной цели необходимо использовать методы, включающие целенаправленную подачу атмосферного воздуха в области карьерного пространства, характе-

ризующиеся отрицательным температурным градиентом, приводящим к развитию зон рециркуляции, потенциально опасных для накопления загрязняющих веществ.

Задачи исследования.

1. Изучение особенностей формирования метеорологических условий регионов Арктической зоны, где расположены золоторудные месторождения.

2. Разработка трехмерной аэрологической модели карьерного пространства для последующего моделирования процесса формирования скоростных и температурных полей в карьерном воздухе при условии совместного влияния естественных и эксплуатационных факторов.

3. Проведение математического моделирования и определение условий, при которых в карьерном пространстве образуются зоны рециркуляции, потенциально опасные для накопления загрязняющих и вредных примесей.

4. Верификация математической модели на основе результатов натурных исследований, полученных на базе действующего золоторудного месторождения Арктической зоны.

5. Обоснование эффективности предложенного способа разрушения зон рециркуляции с помощью искусственной вентиляции.

Научная новизна работы:

1. Выявленные закономерности динамики скоростных и температурных полей при проветривании золоторудных карьеров Арктической зоны России.

2. Полученные зависимости, устанавливающие связь между образующимся объемом зон рециркуляции и формирующимся в объеме карьерного пространства температурным градиентом.

3. Обоснование возможности предотвращения или минимизации в карьерном пространстве образования зон рециркуляции, опасных по накоплению загрязняющих веществ, за счет адресной подачи атмосферного воздуха в области, характеризующиеся отрицательным температурным градиентом.

Практическая значимость работы.

Заключается в обосновании эффективности способа превентивного воздействия на области карьерного пространства, потенци-

ально опасные с точки зрения развития зон рециркуляции и последующего накопления загрязняющих веществ. Предлагаемый способ защищен патентом на изобретение № 2760181 от 26.04.2021. Получен акт внедрения от 07.11.2022.

Теоретическая значимость работы.

Заключается в разработке трехмерных математических моделей, позволяющих осуществлять варианты численные расчеты аэротермодинамических процессов в глубоких золоторудных карьерах Арктической зоны России с учетом вариативности температурных параметров воздушной среды на поверхности, геометрических размеров карьерного пространства и технологии работ по добычи полезного ископаемого.

Методы исследования.

При выполнении работы использовался комплексный метод исследования, включающий в себя: анализ и обобщение результатов ранее опубликованных экспериментальных исследований аэротермодинамических процессов в карьерах; натурные исследования аэротермодинамических параметров воздушной среды при открытой разработке золоторудных месторождений Арктической зоны; статистический анализ данных по метеорологическим условиям района расположения золоторудных месторождений на основе программы Minitab; математическое моделирование аэротермодинамических процессов на основе современного программного продукта Ansys Fluent.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Накопление загрязняющих веществ в карьерном пространстве происходит, как правило, в зонах, с рециркуляционным движением воздушных масс, расположение которых следует определять с учетом стохастических законов изменения метеорологических параметров атмосферного воздуха.

2. Достаточным условием образования зон рециркуляционного движения воздуха, потенциально опасных для накопления загрязняющих веществ, следует считать формирование по простиранию и глубине карьерного пространства температурного поля с положительным и отрицательным значением температурного градиента.

3. Превентивное предупреждение процесса формирования по объему карьерного пространства зон с положительными и отрицательными температурными градиентами может быть достигнуто за счет целенаправленной подачи атмосферного воздуха в области, которые характеризуются отрицательным температурным градиентом.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается использованием современного программного обеспечения для осуществления математического моделирования аэротермодинамических процессов и статистической обработки метеорологической информации; удовлетворительным соотношением результатов моделирования и данных натурных измерений; непротиворечивостью результатов моделирования аналогичным данным других авторов; публикациями результатов исследований в открытой печати; апробацией результатов исследований на международных и всероссийских конференциях.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих симпозиумах и конференциях:

- X Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (14-16 октября 2020 года, г. Санкт-Петербург);
- XXIX Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2021» (23 января 2021 года, г. Москва);
- XV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблема недропользования» (9-11 февраля 2021 года, г. Санкт-Петербург);
- XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (12-16 апреля 2021 года, г. Санкт-Петербург);
- XXVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (12-23 апреля 2021 года, г. Москва);
- IV Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (26-28 октября 2021 года, г. Санкт-Петербург);

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, а также нормативной документации; разработке математической модели для расчетов скоростных и температурных полей, формирующимся в карьерном пространстве; выполнении численных расчетов; проведении натурных измерений скоростных и концентрационных полей в условиях действующего месторождения, обработке и анализе полученных численных и экспериментальных результатов; обосновании технического решения по аэродинамическому воздействию на зоны рециркуляции.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 2 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, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения и списка литературы, включающего 169 наименований. Диссертация изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков и 11 таблиц, 2 приложения.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность профессору, д.т.н. Гендлеру С.Г. за научное руководство работой. За помощь, при выполнении математического моделирования, автор выражает искреннюю признательность сотрудникам кафедры безопасности производств, к.т.н. Серегину А.С., за предоставление специализированного оборудования с целью выполнения натурных исследований, к.т.н. Корневу А.В. и Афанасьеву П.И., за консультирование, к.т.н. Гридиной Е.Б., д.т.н. Рудакову М.Л., к.т.н. Никулину А.Н. Автор глубоко признателен директору Научного центра геомеханики и проблем горного производства д.т.н. Шабарову А.Н. за предоставление технической возможности проведения математического моделирования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыта теоретическая и практическая значимость исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературных источников по теме диссертационной работы. Выполнен: анализ факторов, определяющих аэрогазодинамические условия разработки месторождения полезных ископаемых открытым способом, и дана описательная характеристика каждому из них; анализ различных методов интенсификации естественной вентиляции в карьере. Сделан вывод о ключевых факторах, оказывающих непосредственное влияние на формирование аэродинамических полей в карьере и об необходимости использования в глубоких карьерах комбинированной системы вентиляции, сочетающей естественное и искусственное проветривание.

Во второй главе выполнен анализ аналитических методов оценки аэрологических условий в карьерном пространстве. Описаны базовые принципы построения аэродинамической модели для исследования воздухообмена в карьерном пространстве. Выполнен анализ результатов применения аэродинамических моделей карьера для оценки воздушной среды по аэрогазодинамическому фактору на основе применения современного программного продукта Ansys, Flow Vision и др. Сделан вывод о целесообразности применения современных программных продуктов для исследования особенностей формирования параметров карьерной атмосферы при эксплуатации глубоких месторождений.

В третьей главе представлены результаты натурных измерений параметров воздушной среды на базе действующего золоторудного месторождения Арктической зоны, включающие в себя значения скорости и температуры воздушного потока в карьере, а также результаты измерений концентраций загрязняющих веществ. Сделан вывод о неоднородности формирования скоростных и температурных полей в границах карьерного пространства и о текущем уровне аэрологической безопасности на месторождении.

В четвертой главе описана методология построения аэродинамической модели карьерного пространства в которой были учтены геометрические особенности карьера действующего золоторудного месторождения. На основе математического моделирования определена эффективность естественного проветривания для различных этапов разработки карьера. Выполнен анализ особенностей формирования аэродинамических условий в зависимости от комплексного влияния геометрических параметров карьера и температурных условий района его расположения. Получена зависимость изменения температурного градиента с глубиной карьера. Сделан вывод о преобладающем влиянии внешних факторов на формирование аэрологических условий в карьере, а также установлена глубина ведения добычных работ при которой нормализация параметров атмосферного воздуха возможна в случае разработки дополнительных инженерно-технических мероприятий.

В пятой главе Выполнен анализ особенностей формирования аэродинамических процессов в зависимости от динамики изменения метеорологических условий района расположения месторождения. Установлена зависимость формирования объема зон рециркуляции от скорости и направления движения воздушного потока. Предложен способ аэродинамического воздействия на зоны рециркуляции обеспечивающий нормативные концентрации веществ в воздухе на рабочих местах за счет адресной подачи атмосферного воздуха в проблемные зоны.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Накопление загрязняющих веществ в карьерном пространстве происходит, как правило, в зонах, с рециркуляционным движением воздушных масс, расположение которых следует определять с учетом стохастических законов изменения метеорологических параметров атмосферного воздуха.

Открытая разработка полезных ископаемых связана с осуществлением технологических операций. Рыхление горных пород и транспортировка их на поверхность сопровождается выделением загрязняющих веществ, приводящих к ухудшению условий труда

горнорабочих или к загрязнению окружающей среды в результате выноса вредных примесей воздушным потоком за границы карьера.

Повышение концентрации загрязняющих веществ в воздухе зависит от интенсивности выделения вредностей источником, его расположения относительно границ карьера и аэродинамики воздушного потока, которая в случае естественной вентиляции определяется скоростью ветрового потока на поверхности, а также его направлением движения и глубиной карьера.

Для установления в карьерном пространстве областей, в которых наиболее вероятно накопление загрязняющих веществ, были осуществлены численные расчеты скоростных и концентрационных полей, формирующихся в воздухе, на основе использования программного пакета Ansys. В качестве загрязняющего вещества, выделяющегося при работе транспортного оборудования, был принят оксид углерода, а интенсивность его выделения соответствовала данным натурных измерений, выполненных на действующем месторождении, и составляла 1,42 г/с. Расположение источника выделения вредностей в карьерном пространстве представлено на рисунке 1.

В процессе численных расчетов скорость ветрового потока варьировалась в пределах 1-10 м/с при его действии в западном, южном и восточном направлениях. На рисунке 2 приведены результаты математического моделирования для условий движения ветрового потока в восточном направлении со скоростью 10 м/с. Из полученной аэродинамической картины следует, что у подветренного борта карьера формируется зона, в которой осуществляется рециркуляционное движение воздуха. В этой зоне накапливаются загрязняющие вещества, поступающие в карьерный воздух, концентрация которых возрастает с течением времени, достигая значений, превышающих предельно-допустимые величины. Из результатов математического моделирования установлена зависимость концентрации вредных веществ от времени, которая представлена на рисунке 3. Из нее следует, что для условий, характеризующих поле скоростей на рисунке 2, концентрация оксида углерода достигнет уровня ПДК через 44 мин после начала действия источника вредных примесей.

От изменения скоростей и направления движения ветрового потока на поверхности зависит расположение в карьерном пространстве зон рециркуляции и их объем. Учитывая то, что появление каждой величины скорости ветрового потока для каждого из географических направлений его действия характеризуются определённой вероятностью, представленной на рисунке 4, то расположение и объем формирующихся под действие ветрового напора зон рециркуляции также должен иметь вероятностный характер. Это подтверждается результатами вариантных расчётов, результаты которых обобщены и представлены на рисунке 5. Из анализа графической зависимости следует, что с увеличением скорости движения воздушного потока, пересекающего карьерное пространство, объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс возрастает от 1 до 40% от общего объёма выработанного пространства. Движение ветрового потока в восточном направлении со скоростью 3 м/с, которое реализуется с максимальной вероятностью 11%, приводит к образованию зон рециркуляции, объем которых равен 12% от общего объёма выработанного пространства.

2. Достаточным условием образования зон рециркуляционного движения воздуха, потенциально опасных для накопления загрязняющих веществ, следует считать формирование по простиранию и глубине карьерного пространства температурного поля с положительным и отрицательным значением температурного градиента.

В процессе разработки месторождения внутри границ карьерного пространства имеют место аэродинамические процессы, которые приводят к образованию зон рециркуляционного движения воздушных масс. Зачастую это связано с возникновением температурных инверсий. Для определения условий развития температурных инверсий при естественной вентиляции, было выполнено математическое моделирование скоростных полей воздушных потоков при различных температурных градиентах, формирующихся в атмосфере. На основании численных экспериментов установлено, что внутри карьерного пространства преобладает три формы инверсии: с положительным, нулевым и отрицательным температурным градиентом.

Инверсия с положительным температурным градиентом указывает на то, что сформировавшаяся среда в карьере теплее поступающего потока воздуха извне. Для данного условия характерно увеличение температуры с глубиной на величину адиабатического градиента температуры ($\Delta t > 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C/м}$), что обеспечивает восходящее движение воздушных потоков. При этом такое состояние атмосферы классифицируется как неустойчивое.

Инверсия с нулевым температурным градиентом является промежуточным звеном между инверсией с положительным и отрицательным температурным градиентом. Особенность этого условия заключается в том, что на формирование поля скоростей не влияет температура среды и поступающего потока воздуха, а влияют только лишь геометрические особенности карьерного пространства.

Инверсия с отрицательным температурным градиентом, представленная на рисунке 6, указывает на то, что воздушные массы в карьере имеют более низкую температуру, чем поступающий с поверхности воздушный поток. Для рассматриваемого случая характерно убывание температуры воздуха по глубине, характеризующееся величиной адиабатического градиента ($\Delta t < 0 \text{ }^{\circ}\text{C/м}$), что обеспечивает устойчивую стратификацию атмосферы (рисунок 7). В случае выделения различных газообразных продуктов или пыли такая стратификация обуславливает их накопление в воздушной среде.

В результате обработки результатов вариантных расчётов установлена зависимость объёма зон рециркуляции от температурного градиента, представленная на рисунке 8, из которой следует, что при положительном температурном градиенте объём образующихся зон обратного движения воздуха не превышает 5% от общего выработанного пространства и при этом обеспечивается полноценный вынос загрязняющих веществ за границы карьера с помощью естественной вентиляции. При отрицательном температурном градиенте объём образующихся зон рециркуляции достигает 30%, а эффективность естественной вентиляции значительно снижается.

На основании данных математического моделирования получена зависимость температурного градиента от глубины карьера, представленная на рисунке 9, которая свидетельствует о том, что до глубины карьера в 200 метров обеспечивается эффективное провет-

ривание, как подветренного борта карьера, так и всего выработанного пространства потоками воздуха, формирующимися за счет естественной вентиляции. С увеличением глубины более 200 метров эффективность естественной вентиляции начинает значительно снижаться, что подтверждается формированием температурного поля с отрицательным температурным градиентом.

3. Превентивное предупреждение процесса формирования по объему карьерного пространства зон с положительными и отрицательными температурными градиентами может быть достигнуто за счет целенаправленной подачи атмосферного воздуха в области, которые характеризуются отрицательным температурным градиентом.

С развитием месторождения полезного ископаемого конфигурация карьерного пространства постоянно изменяется, в том числе увеличивается глубина ведения добычных работ и плановые размеры, что увеличивает вероятность образования зон рециркуляции. В результате численных расчетов установлено, что проветривание только за счет естественной вентиляции приводит к образованию зон рециркуляционного движения, объем которых составляет 25-30% от общего выработанного объема карьерного пространства.

Так как образующиеся зоны потенциально опасны для накопления загрязняющих веществ, то для уменьшения вероятности повышения концентрации вредных примесей в данных зонах следует предусматривать мероприятия по их разрушению за счет обеспечения монотонного характера изменения температуры по глубине карьера с положительным температурным градиентом. Для достижения этого результат в зоны с отрицательным температурным градиентом, совпадающие с зонами рециркуляции, необходимо подать воздух с температурой, равной температуре атмосферного воздуха. Одним из путей решения этой задачи является подача воздуха по системе выработок, пройденных в горном массиве по бортам карьера и связанных с карьерным пространством с помощью штолен. Экономическая целесообразность сооружения горных выработок существенно повышается, если по ним будет дополнительно осуществляться доставка отбитой руды с рабочих горизонтов к местам ее переработки.

В результате использования для проветривания карьера принудительной вентиляции осуществляемой путем подачи воздуха с начальной скоростью 2 м/с по 5 подземным горным выработкам (штольни), имеющим выход в карьерное пространство, конфигурация поля скоростей в карьерном пространстве значительно изменяется (рисунок 10). При этом средняя скорость воздушного потока в карьере устанавливается на уровне 2,0 м/с и объем зон рециркуляции снижается до 5-8% от общего выработанного объема карьерного пространства. Таким образом, наибольшая эффективность применения данного способа ограничивается расположением зон рециркуляционного движения воздушных масс на расстоянии, не превышающем 30-50 метров от бортов карьера. Данный вывод подтверждается результатом математического моделирования скоростных полей в карьере, конфигурация которого характеризует завершающий этап разработки месторождения с глубиной ведения добычных работ на уровне 650-700 метров.

В случае же, если зоны рециркуляции находятся за пределами обозначенного расстояния, то наиболее эффективным следует считать способ вентиляции, сочетающий в себе применение подземных горных выработок и гибких трубопроводов, расположенных внутри границ карьерного пространства (рисунок 11).

Эффективность предлагаемого способа подтверждена сопоставительным анализом результатов математического моделирования аэротермодинамических процессов при естественном способе проветривания и сочетании естественного и принудительного способов проветривания.

Из результатов математического моделирования следует, что при естественном проветривании образуется зона с отрицательной инверсией, в которой происходит рециркуляция карьерного воздуха и накопление загрязняющих веществ. Для разрушения зоны с отрицательной температурной инверсией в неё по десяти гибким воздуховодам, диаметром 0,5 м, расположенных по глубине и простирающую карьера, с помощью вентилятора осуществляется подача атмосферного воздуха с температурой, превышающей температуру, заполняющего её воздуха. Общий расход воздуха составляет 60 м³/с, а скорость воздуха на выходе из каждого гибкого воздуховода в карьер-

ерное пространство составляет 5 м/с. В результате взаимодействия двух воздушных потоков, вызванных движением воздуха за счёт естественных факторов и принудительной вентиляцией через систему гибких трубопроводов, объем зоны рециркуляции в карьере сокращается до 1-2% от общего выработанного объема карьерного пространства, а средняя скорость воздушного потока устанавливается на уровне 2,0 м/с (рисунок 12).

Использование предлагаемого способа проветривания глубоких карьеров даёт возможность осуществить превентивное предупреждение образования в карьерном пространстве зон с отрицательной температурной инверсией, в которых могут накапливаться загрязняющие вещества, образующиеся в процессе открытой разработки месторождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается решения актуальной научной задачи – предотвращение процесса накопления вредных газов и пыли в глубоких золоторудных карьерах, расположенных в Арктической зоне.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Математическое моделирование аэрогазодинамических процессов при вентиляции глубоких карьеров позволяет с высокой точностью определять температурные и химические характеристики воздушной среды в карьерном пространстве с учётом горнотехнических и метеорологических факторов.

2. Формирующиеся в процессе разработки месторождения зоны рециркуляционного движения воздушных масс в карьере являются опасными для накопления загрязняющих и отравляющих примесей, образующихся при выполнении ряда технологических операций в карьере. Это в свою очередь приводит к снижению эффективности естественной вентиляции.

3. Эффективность естественной вентиляции ограничивается глубиной ведения добычных работ. До глубины в 200 метров обеспечивается эффективное проветривание как подветренного борта

карьера, так и всего выработанного пространства воздушными массами, формирующимися за счет естественных ветровых потоков. С увеличением глубины начинают формироваться застойные зоны, что формирует условия, при которых 11% от общего рабочего времени предприятия не обеспечивается полноценный вынос за границы карьерного пространства всего объема загрязняющих атмосферу веществ. С увеличением скорости движения воздушного потока, пересекающего карьерное пространство, аэрологическая ситуация усугубляется, вследствие того, что объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс относительно общего выработанного пространства возрастает до 40% от общего объема выработанного пространства.

4. Для воздушной среды карьеров Арктической зоны России характерно образование трёх типов инверсий: с положительным, отрицательным и нулевым температурным градиентом. Наиболее неблагоприятные условия с точки зрения аэрологической безопасности имеют место при отрицательном температурном градиенте, когда в карьерном пространстве начинают образовываться зоны рециркуляции воздуха, в которых могут накапливаться вредные и опасные примеси. Объем зон рециркуляции зависит от характера изменения метеорологических параметров атмосферного воздуха и может быть установлен в результате численного моделирования, которое должно предшествовать процессу ведения добычных работ.

Такой подход позволит повысить эффективность разработки месторождения на каждом из этапов развития за счет сокращения внеплановых простоев после проведения ряда технологических операций.

5. Для вентиляции глубоких карьеров, расположенных в условиях сурового климата, необходимо применение комбинированного способа, сочетающего естественное проветривание и принудительную подачу воздуха по системе каналов в зоны рециркуляции и застойные зоны. Использование принудительной вентиляции через систему подземных горных выработок, приводит к сокращению объема зон рециркуляции до 5-8% от общего выработанного объема карьерного пространства. Более эффективным методом является принудительная вентиляция через систему гибких трубопро-

водов, подвешенных на тросах. Данный метод приводит к более значительному сокращению объема зон рециркуляции до 1-2% от общего выработанного объема карьерного пространства за счет адресного воздействия на застойную зону, что позволяет обеспечивать нормализацию параметров рудничной атмосферы после проведения ряда технологических операций в карьере.

Перспективным направлением развития научных исследований по тематике диссертации является развитие теоретических основ построения аэродинамических моделей с целью выявления закономерностей динамики скоростных и температурных полей, а также прогнозирования аэрологических условий, формирующихся при разработке месторождений полезных ископаемых, для различных условий в зависимости от метеорологических, орографических и технологических факторов. Это позволит повысить эффективность разработки месторождения за счет более грамотного планирования горных работ, а также минимизации времени внеплановых простоев на каждом из этапов развития месторождения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Гендлер, С.Г. Оценка эффективности естественного проветривания карьеров при отработке золоторудных месторождений на основе математического моделирования аэродинамических процессов / Гендлер С.Г., **Борисовский И.А.** // Известия Тульского государственного университета. Серия "Науки о Земле". - 2020. - № 4. - С. 441-452.

2. Гендлер, С.Г. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики / Гендлер С.Г., **Борисовский И.А.** // Известия Тульского государственного университета. Серия "Науки о Земле". - 2021. - № 4. - С. 59-75. DOI 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75.

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

3. Gendler, S.G. Aerodynamic control in open pit gold mining. / Gendler S.G., **Borisovsky I.A.** // Mining Informational and Analytical

Bulletin. 2021(2), pp. 99–107. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.

4. Gendler, S.G. Estimated impact of temperature conditions on deep pits natural ventilation in the Arctic. / Gendler S.G., **Borisovskiy I.A.** // Sustainable Development of Mountain Territories, 2022, 14(2), pp. 218–227. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.

Патент:

5. Патент № 2760181 Российская Федерация, МПК E21F 1/00 (2006.01). Способ проветривания глубоких карьеров: № 2021111806 : заявл. 26.04.2021 : опубл. 22.11.2021 Бюл. № 33 / С.Г. Гендлер, А.В. Лейсле, **И.А. Борисовский**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU). – 12 с.

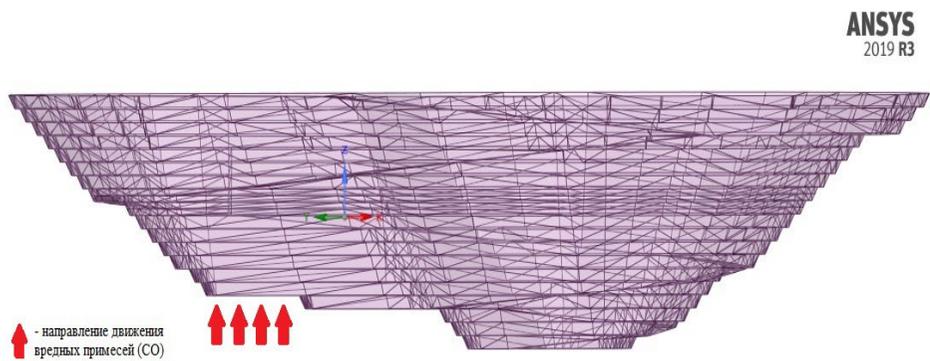


Рисунок 1 - Фронтальная проекция 3D модели карьера с иллюстрацией направления движения вредных примесей.

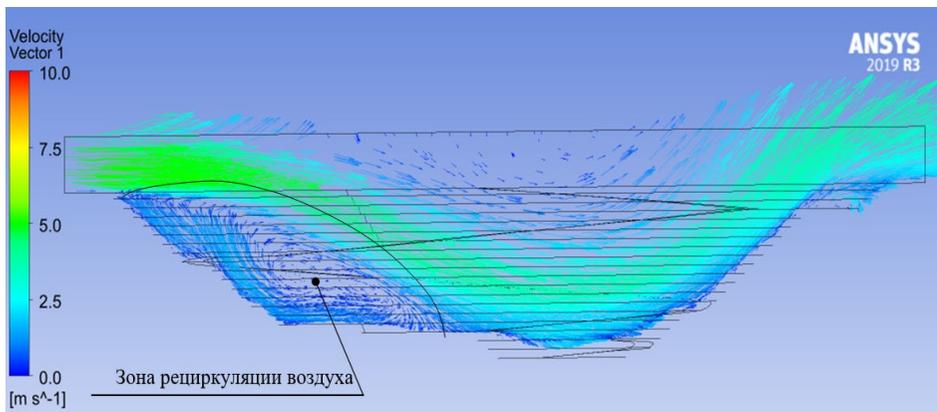


Рисунок 2 - Поле скоростей внутрикарьерном пространстве при движении воздушного потока со скоростью 10 м/с

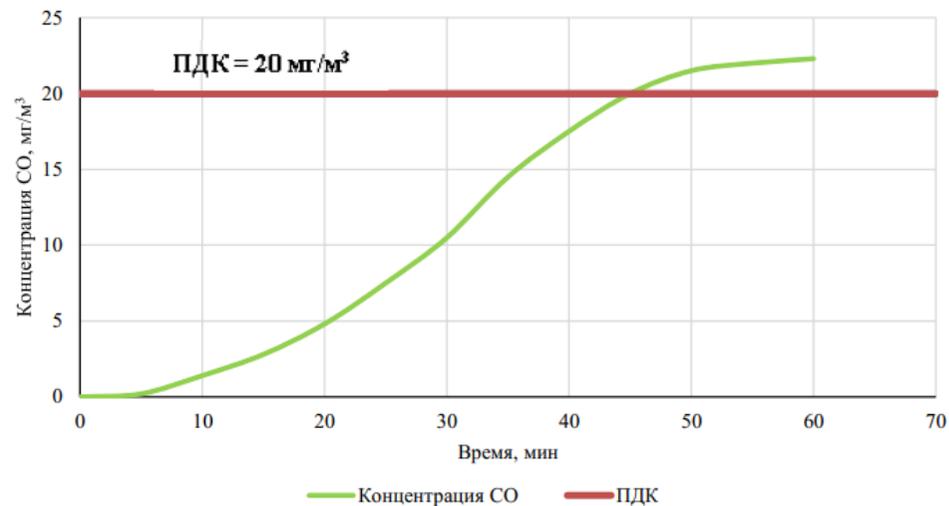


Рисунок 3 - Динамика изменения концентрации угарного газа на рабочем горизонте

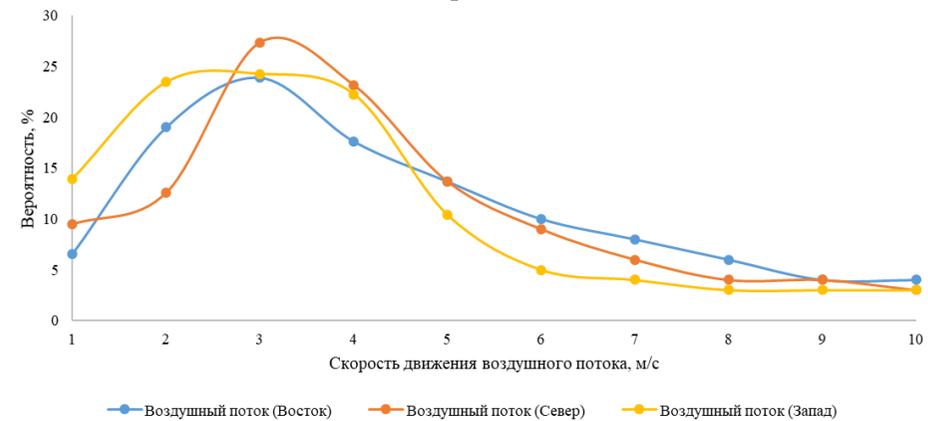


Рисунок 4 - Вероятность достижения скорости движения воздушного потока по соответствующему направлению в районе расположения месторождения

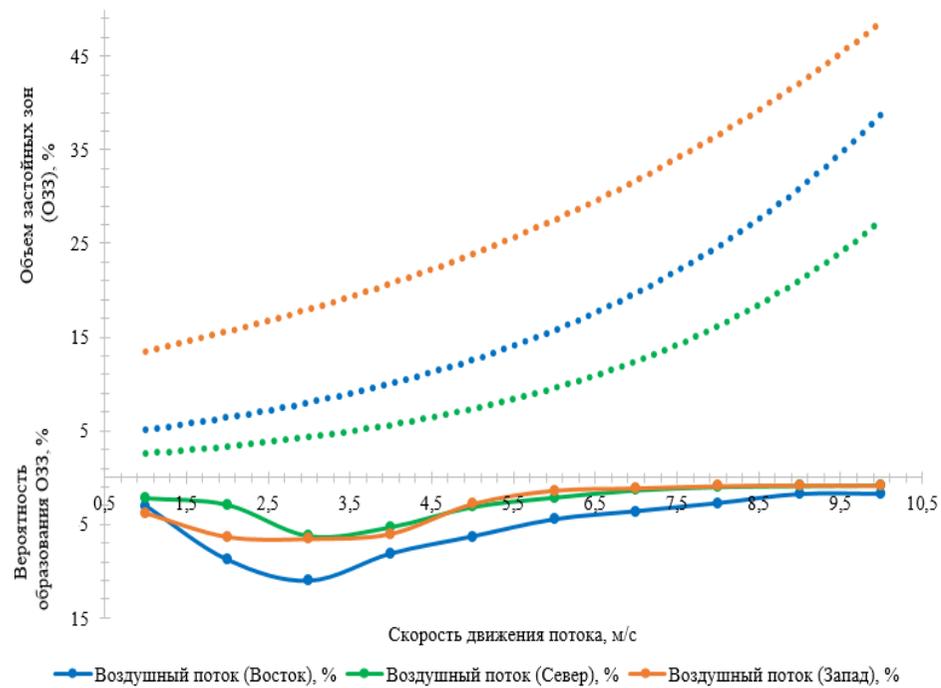


Рисунок 5 – Объем застойных зон, образующейся в карьерном пространстве, в зависимости от скорости ветрового потока, вероятность равенства которой, определяется направлением ветрового потока и вероятности соответствующих аэрологических условий при движении воздуха с определенной скоростью и направлением

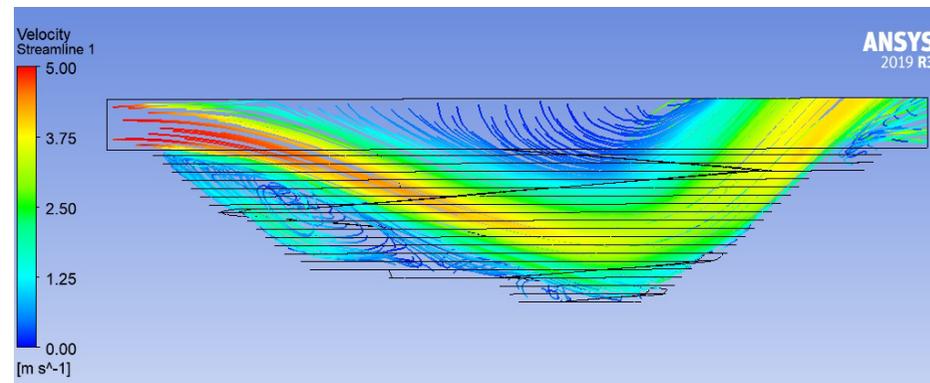


Рисунок 6 - Скоростное поле в случае инверсии с отрицательным температурным градиентом.

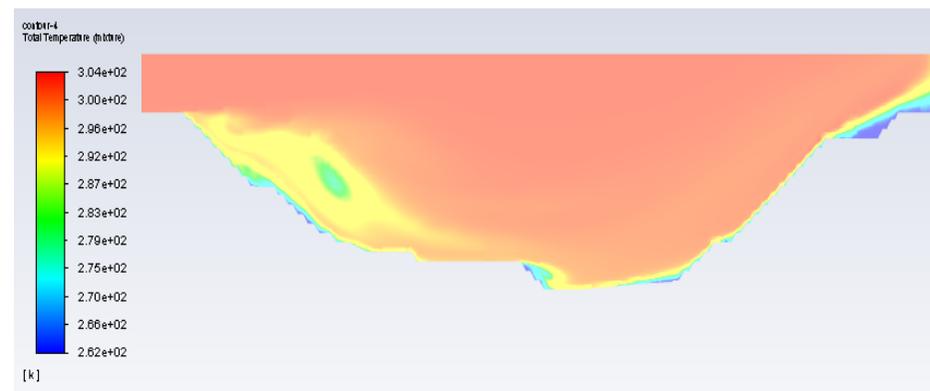


Рисунок 7 - Температурное поле в случае инверсии с отрицательным температурным градиентом.

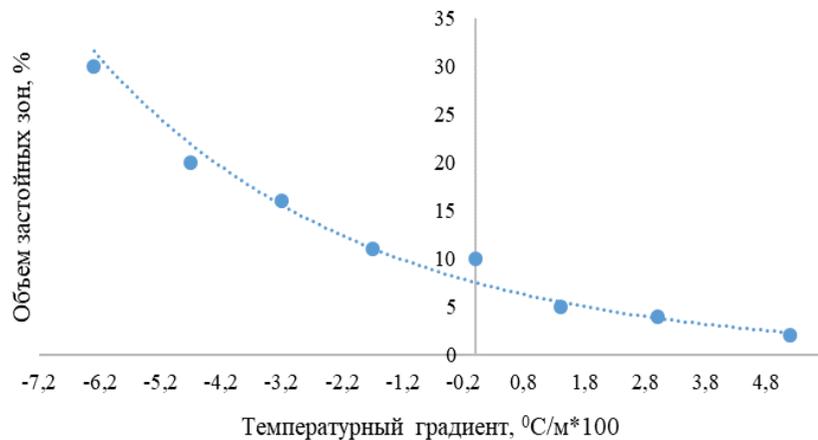


Рисунок 8 - Зависимость объема зон рециркуляции от температурного градиента в воздушной среде карьера.

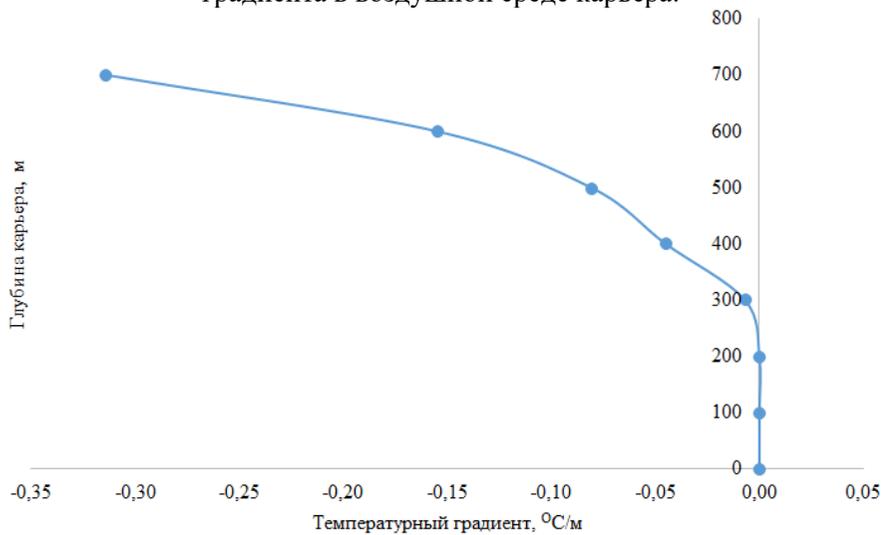


Рисунок 9 - Сводный профиль температурного градиента в зависимости от глубины карьера.

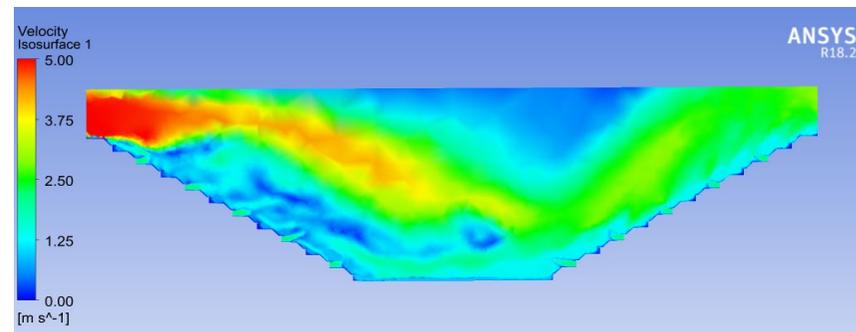


Рисунок 10 - Распределение скоростей воздушного потока в карьерном пространстве при совместной естественной и принудительной вентиляции на момент завершения разработки месторождения

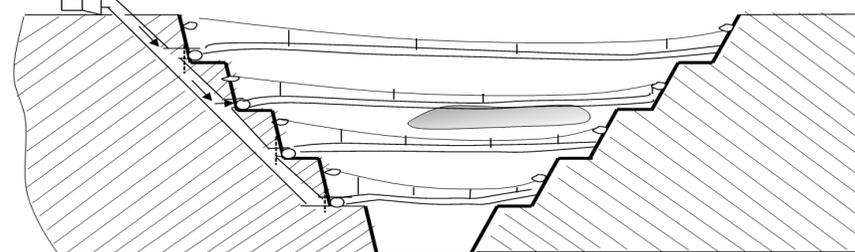


Рисунок 11 - Вертикальный разрез карьера с трубопроводами для подачи воздуха

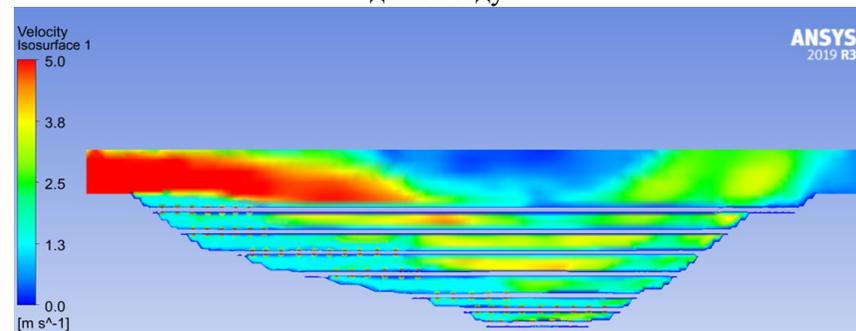


Рисунок 12 - Скоростное поле при условии совместного действия естественной и принудительной вентиляции в карьере