

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

*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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Санкт-Петербург – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Влияние аэротермодинамических условий на безопасность разработки месторождения открытым способом.....	11
1.2 Анализ факторов, определяющих аэротермогазодинамические условия разработки месторождения полезных ископаемых открытым способом .....	17
1.2.1 Горнотехнические факторы.....	17
1.2.1.1 Ориентация и географическое положение карьерного пространства .....	17
1.2.1.1 Конфигурация карьерного пространства .....	18
1.2.1.1.1 Система разработки пологих и горизонтальных месторождений .....	18
1.2.1.1.2 Система разработки наклонных и крутых месторождений.....	19
1.2.1.1.2.1 Система разработки с перевозкой горной массы железнодорожным транспортом .....	20
1.2.1.1.2.2 Система разработки с перевозкой горной массы автомобильным транспортом .....	21
1.2.1.1.2.3 Система разработки с применением комбинированного транспорта .....	22
1.2.2 Метеорологические факторы .....	24
1.2.2.1 Солнечная радиация в карьере.....	24
1.2.2.2 Температурный режим почвы и воздуха в карьерах.....	27
1.2.2.3 Температурная стратификация атмосферы в карьере.....	29
1.2.2.4 Скорость движения воздушного потока по Земной поверхности .....	30
1.2.2.5 Период времени ведения добычных работ в карьере .....	31
1.3 Методы нормализации параметров рудничной атмосферы в карьерном пространстве .....	33
1.3.1 Методы искусственной вентиляции в карьере .....	33
1.3.1.1 Крутонаклонный подъемник и трубопроводы для подачи свежей струи в застойные зоны.....	33
1.3.1.2 Подземные горные выработки для подачи свежей струи в застойные зоны.....	35
1.3.2 Методы борьбы с пылеобразованием в карьере.....	37
1.3.2.1 Искусственное генерирование осадков.....	37
1.3.2.2 Создание водяной завесы .....	38
1.3.2.3 Солнечная радиация для нагрева застойных зон.....	39
1.4 Выводы по Главе 1 .....	40
<b>ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В КАРЬЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....</b>	<b>42</b>
2.1 Аналитический метод исследования воздушной среды в карьере .....	42
2.1.1 Расчет естественного проветривания карьера и определение структуры проветривания рабочей зоны карьера .....	42
2.1.2 Расчет вентиляции карьера при наличии внутренних источников вредностей в виде работающей горной и транспортной техники .....	45

2.2 Численный метод исследования воздушной среды в карьере .....	48
2.2.1 Способы учета орографии в расчетных моделях .....	50
2.2.2 Основные принципы конечно-разностных уравнений, применяемые для расчета моделей .....	51
2.2.3 Модель радиационного баланса и теплового режима подстилающей поверхности .....	53
2.2.4 Расчетная модель воздействия загрязняющих примесей на атмосферу карьеров в трехмерной постановке задачи .....	56
2.2.5 Двумерные расчетные модели микроклимата и проветривания карьеров .....	57
2.2.6 Простейшая модель естественной аэрации карьерных пространств.....	58
2.2.7 Двумерная модель микроклимата и загрязнения карьеров.....	58
2.2.8 Модель процесса воздухообмена в карьерном пространстве с плавающей верхнеуровневой границей воздушной среды .....	59
2.2.9 Двумерная модель искусственного проветривания карьеров.....	60
2.3 Метод математического моделирования для исследования воздушной среды в карьере.....	61
2.4 Выводы по Главе 2 .....	64
<b>ГЛАВА 3 НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КРАЙНЕГО СЕВЕРА.....</b>	<b>66</b>
3.1 Анализ концентраций и химического состава воздушной среды на местах выполнения работ в карьере.....	66
3.1.1 Физико-химический анализ рудничной атмосферы и анализ ретроспективных данных по загрязнению атмосферы в карьере.....	68
3.1.2 Анализ результатов измерения концентраций загрязняющих веществ на рабочих местах .....	71
3.1.3 Прогнозная оценка по результатам измерений концентрации .....	75
3.2 Анализ метеорологических параметров воздушной среды в карьерном пространстве .....	77
3.2.1 Анализ измерений скоростных и температурных характеристик воздушной среды в карьере .....	78
3.3 Выводы по Главе 3 .....	82
<b>ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КАРЬЕРОВ.....</b>	<b>84</b>
4.1 Методология разработки аэродинамической модели карьерного пространства золоторудного месторождения .....	84
4.2 Верификация аэродинамической модели Ansys Fluent .....	88
4.3 Оценка влияния аэродинамических процессов на экологическую обстановку в карьере золоторудного месторождения .....	91
4.4 Оценка эффективности естественного проветривания на различных этапах развития золоторудного месторождения .....	95
4.5 Оценка влияния температурных условий на эффективность естественного проветривания в карьере золоторудного месторождения .....	98
4.6 Выводы по Главе 4.....	110
<b>ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАТИВНЫХ УСЛОВИЙ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ В КАРЬЕРЕ.....</b>	<b>112</b>

5.1 Оценка влияния скорости и направления движения воздушного потока на эффективность естественного проветривания в карьере золоторудного месторождения.....	112
5.2 Применение подземных горных выработок для повышения эффективности естественной вентиляции в карьере.....	121
5.3 Комбинированное применение гибких трубопроводов и подземных горных выработок для интенсификации естественной вентиляции в карьере.....	124
5.4 Выводы по Главе 5.....	128
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>130</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>132</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение способа проветривания глубоких карьеров.....</b>	<b>147</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения.....</b>	<b>148</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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 объёма 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 вещества, 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 V., 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 результате 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.

**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, характеризующиеся 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 натуральных исследований, полученных на базе действующего золоторудного месторождения Арктической зоны.

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

#### **Научная новизна.**

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, потенциально опасные с точки зрения развития зон рециркуляции и последующего накопления загрязняющих веществ. Предлагаемый способ защищен патентом на изобретение № 2760181 от 26.04.2021 (приложение А). Получен акт внедрения от 07.11.2022 (приложение Б).

**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.

**Положения, выносимые на защиту.**

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 (пункты списка литературы № 33-39), 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 (пункт списка литературы № 40).

**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.

## ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ

### 1.1 Влияние аэротермодинамических условий на безопасность разработки месторождения открытым способом

На большинстве месторождений, расположенных в Арктической зоне России, добыча драгоценных металлов осуществляется открытым способом. Основным условием добычи полезного ископаемого является постоянное повышение эффективности производственных процессов, что позволяет сократить потери и, тем самым, снизить себестоимость конечного продукта [3]. На эффективность ведения добычных работ оказывают влияние термодинамические и химические параметры рудничной атмосферы. Их величина зависит от метеорологических и орографических условий района расположения месторождения полезного ископаемого, в том числе и от особенностей ведения добычных работ [4].

Метеорологические условия в карьерном пространстве характеризуются определенными параметрами рудничной атмосферы, одним из которых является температура. Температурный режим в карьерном пространстве и температура воздушного потока, протекающего по Земной поверхности, изменяются на постоянной основе и зависят от рассматриваемого времени суток или года. Распределение температуры воздуха в карьере и за его границами демонстрирует температурная стратификация атмосферы, которая оказывает влияние на формирование скоростных полей в карьерном пространстве [8,9]. Таким образом, в результате воздействия различных условий среды формируются отличные друг от друга комбинации температурных и скоростных полей, которые группируются следующим образом [10]:

Первый тип – наблюдается повышение значения температуры воздушной среды на величину адиабатического градиент температуры ( $\Delta t > 1^{\circ}$  на 100 м) с увеличением глубины ведения добычных работ. Текущее формирующееся состояние атмосферы классифицируется как неустойчивое, что в свою очередь, приводит к перемещению воздушных масс по вертикали, образуются восходящие потоки.

Второй тип – наблюдается рост температуры с увеличением глубины ведения добычных работ, при этом изменение значения температуры значительно отличается от адиабатического градиента в меньшую сторону.

Третий тип – значение температуры наблюдается постоянным в воздушной среде ( $\Delta t = 0$ ) с увеличением глубины ведения добычных работ. Атмосфера для данного типа характеризуется как устойчивая.

Четвертый тип – отмечено снижение значения температуры воздушной среды с увеличением глубины ведения добычных работ. Такое состояние воздушной среды классифицируется как инверсионное, при это воздушные слои в вертикальном направлении достаточно стабильные ( $\Delta t < 0$ ).

Неравномерность нагрева различных участков карьера создаёт условия, при которых образуются объемы местных воздушных масс с различными температурными характеристиками в приземном слое атмосферы. Таким образом, формируется термический режим почвы, определяющий её взаимодействие с приземным слоем воздуха [16,17]. Величина установившегося температурного режима воздуха и почвы в карьерном пространстве в первую очередь зависит от интенсивности воздействия солнечной радиации в совокупности с теплом, которое образовывается на различных глубинах разрабатываемого месторождения. Общеизвестным фактом является то, что тепловая энергия, формирующаяся внутренней энергией Земли, оказывает непосредственное влияние на величину установившегося температурного режима в карьерном пространстве. Особенно явно данный факт наблюдается на карьерах с большой глубиной ведения добычных работ, где на постоянной основе происходит теплообмен между почвой и воздухом, массообмен с окружающей карьер средой, а также постоянное увеличение температуры горных пород на величину равную одному градусу на каждые 25-35 метров глубины [18].

При движении тепловой энергии от воздушных масс к почвенному слою температурные характеристики объема воздуха в приземном слое снижаются, тем самым, их плотность возрастает и становится отличной от вышележащих слоев воздуха, что приводит к их скоплению в донной части карьерного пространства, в результате это может привести к образованию инверсий [26,27].

Инверсия имеет ряд разновидностей и каждый типов имеет свои отличительные особенности. Например, приземная инверсия характеризуется устойчивостью в приземном воздушном слое, в особенности это касается данной части карьера. Технология формирования приземного типа инверсии можно обосновать оттоком тепловой энергии от приземных слоев воздуха вследствие наличия сниженной величины температуры в сравнении с температурной характеристикой почвенного слоя [29].

Разновидность поверхностной инверсии противоположна приземной по характеру образования. При этом формирующиеся условия характеризуются величиной температурного градиента, величина которого отлична от значения адиабатического температурного градиента в меньшую сторону. Данные условия характерны для верхнего уровня карьерного пространства и для территории за его границами. Стабильное состояние атмосферы в карьере на прямую зависит от накопленного объема тепловой энергии в воздушном слое, который располагается

под инверсионным слоем, а также от глубины распределения инверсии поверхностного типа и от основных параметров воздушных масс, таких как скорость и их направление движения. Вследствие пересечения карьерного пространства объемами воздушных масс, имеющих более низкое значение температуры, образуются инверсии поверхностного типа [30].

Частными являются случаи, когда значение температурного градиента в слое или нескольких слоях отличается от адиабатического температурного градиента в меньшую сторону. Инверсия такого типа классифицируется как приподнятая или слоистая. При условии образования под инверсионным слоем объем воздушного потока, имеющего нестабильное значение температурного градиента, говорит о том, что осуществляется активное воздействие на слой инверсии со стороны подстилающего слоя. Таким образом, атмосфера такого вида будет не стабильна по температурному фактору, что связано в первую очередь с наличием достаточного объема тепловой энергии в воздушном слое, который располагается под инверсионным слоем и тем самым компенсирует дефицит энергии в нем. В случае обратной ситуации, слой инверсии приподнятого типа будет в целом компенсировать энергетический дисбаланс, за счет поглощения объема тепловой энергии воздушного слоя, располагающегося под инверсионным слоем и тем самым обеспечивая сохранность стабильного состояния атмосферы [19].

На рисунке 1.1 показаны типичные закономерности распределения градиента температуры воздуха с глубиной, [24] полученные на основании материалов зондирования атмосферы в карьерах на золоторудных месторождениях России. Также следует отметить факт неравномерного убывания градиента температуры на различных глубинах, зарегистрированный практически во всех случаях. Это объясняется наличием в области карьера горизонтальных градиентов температуры, что и формирует непостоянный шаг их изменения по глубине.

Таким образом, неравномерное распределение теплоты по бортам карьера, вследствие постоянного развития месторождения и образования поверхности карьера с определенным покрытием, влажностью, ведет к тому, что часть поверхности карьера имеет длительный период времени отрицательный радиационный баланс, то есть потеря тепла преобладает над поступлением, это в свою очередь может привести к деформации (разрушению) горных пород, слагающих месторождение [25].

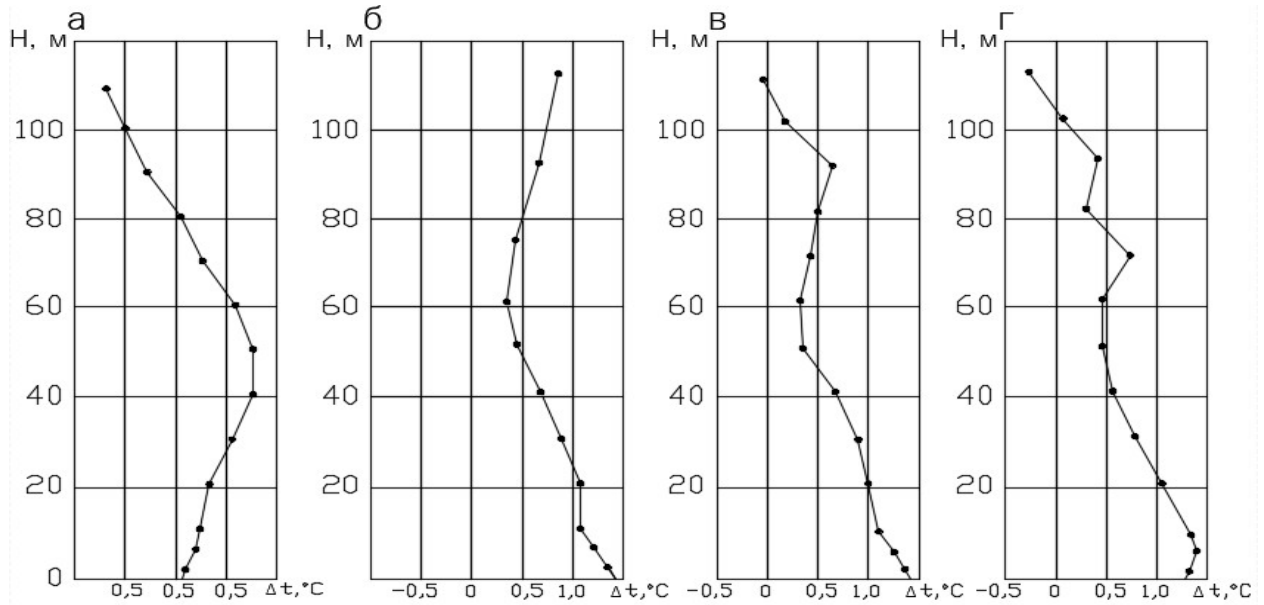


Рисунок 1.1 - Основные типы инверсий в карьерах:

а – приземная; б – поверхностная; в – приподнятая; г - слоистая

На основании представленной диаграммы на рисунке 1.2, зависимости прочности мерзлых пород от их температуры и влажности, можно отметить, что с ростом отрицательных температур прямая на графики, характеризующая прочностную характеристику, стремиться к вертикальной прямой.

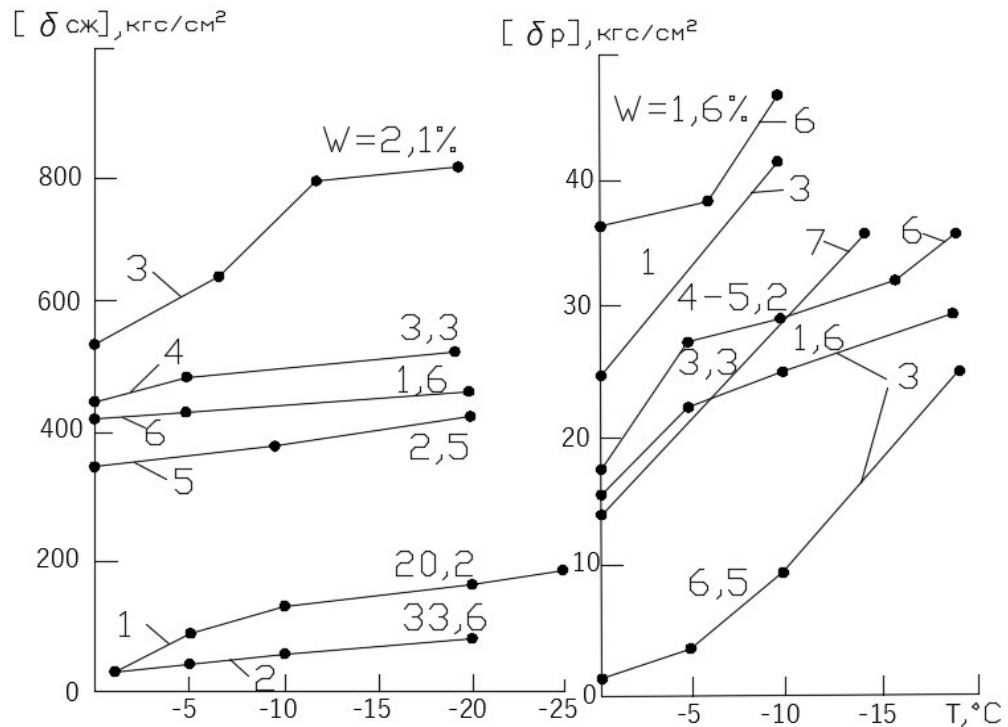


Рисунок 1.2 - Зависимость пределов прочности мерзлых пород от их температуры (Т) и влажности (W): 1 - песок; 2 - глина; 3 - плотный песчаник Сангарского месторождения; 4 - глинистый сланец; 5 - аргиллит; 6 - среднезернистый песчаник Аркагалинского месторождения; 7 - тальк хлорит

Таким образом, прочностные характеристики растут совместно с отрицательной температурой и на оборот, при достижении положительных величин и последующим увеличением, прочность горных пород снижается, и горный массив потенциально становится не устойчивым.

Дополнительный негативный эффект влияния переменных температур рудничного воздуха, обуславливающий замерзание – оттаивание верхних слоев породы, может привести к интенсивному выветриванию, снижению прочности вплоть до полной дезинтеграции [98].

Физически переменные температуры воздействуют на горную породу следующим образом: любая горная порода состоит из атомов, которые совершают тепловые колебания в узлах кристаллической решетки. Периодический разрыв химической связи происходит под действием тепловых флуктуаций. Протекание описанного процесса в наибольшей степени зависит от энергии активации и температуры. Вероятность возрастает с увеличением температуры и снижением энергии активации. Однозначно, что при отсутствии внешних воздействий (напряжений) энергия, необходимая для разрыва химических связей, будет равна энергии связей [41,42].

В состав горных пород, слагающих месторождение, входят различные минералы с индивидуальными тепловыми характеристиками, электрическими и магнитными, то есть для ряда видов горных пород достижение максимальных значений предела прочности на сжатии будет зависеть от температуры нагревания. Например, для мелкозернистого гранита максимальный предел прочности на сжатии достигается при температуре 650 К. Для плотных мелкозернистых пород при нагревании до 1000 К возникает повышение прочностных характеристик, а для крупнозернистых с самого начала нагрева прочность снижается. Если рассматривать любой вид пород, то при достижении температур выше 1000 К наблюдается разупрочняющий эффект [56].

С повышением температуры характерно увеличение модуля Юнга для некоторых аморфных и мелкозернистых горных пород. Для глинистых характерно спекание частиц и их упрочнение, таким образом, возрастают прочностные характеристики. С ростом температуры релаксация напряжений, ползучесть и пластичность увеличиваются [43].

Что касается влияния низких температур, то научно установлено, что увеличение прочностных свойств горной породы, а именно крепость, модуль упругости, твердость происходит при понижении температуры, а также происходит снижение пластических и реологических характеристик. Результаты исследований представлены на рисунке 1.3. Таким образом, под воздействием различных отрицательных температур повышаются прочностные свойства [28].

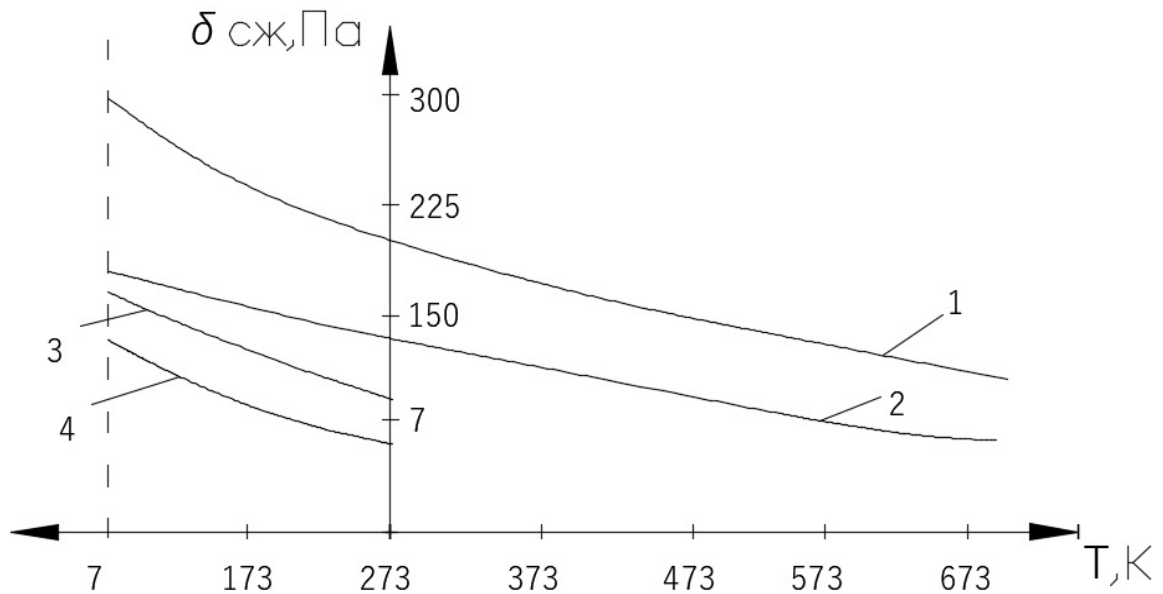


Рисунок 1.3 - Изменение предела прочности при одноосном сжатии в зависимости от температуры: 1 – железистый кварцит; 2 – гранит; 3 – габбро; 4 – лабрадорит;

Следующим ключевым фактором, оказывающим непосредственное влияние на формирование розы ветров, являются особенности ведения добычных работ, которые определяются физико-механическими свойствами горных пород, зависящими от их температуры, конфигурации карьера (длина, ширина, глубина), технологии ведения добычных работ и используемого горнотранспортного оборудования [44].

Степень влияния формы карьера на траекторию движения воздушных масс выражается в карьерах с определённой конфигурацией, которая характеризуется значительной протяженностью по длине и небольшой шириной. Зачастую конфигурация карьера определяется морфологическими и геологическими условиями залегания рудной залежи. От условий залегания зависит выбор величины соотношения между значением длинной оси карьер ( $L_{\text{п}}$ ) и глубиной карьера ( $H$ ), оказывающих влияние на формирование скоростей воздушного потока и эффективность естественной вентиляции. На основании результатов работ Битколова Н.З. и Медведева И.И. установлено [22], что в случае превышения данного соотношения величины в 0,1, начинают развиваться зоны рециркуляции. Интенсивность накопления загрязняющих веществ зависит от величины их выбросов при работе горнотранспортного оборудования, при транспортировке горной массы и ее дробления, а также от технологии рыхления горных пород (буровзрывной способ, механическое или гидравлическое разрушение).

На начальных этапах развития месторождения нормализация рудничной атмосферы обеспечивается естественной вентиляцией, создаваемой в результате действия ветрового напора, за счет которого формируется воздушный поток, пересекающий карьерное



пространство и обеспечивающий вынос за границы карьера всего объема загрязненного воздуха. При этом в связи с тем, что профиль площади участка, занимаемого карьером, в сравнении с окружающей территорией отличается незначительно, его проветривание осуществляется аналогично открытым площадкам [45].

С развитием месторождения увеличивается глубина выработанного пространства и эффективность действия естественного способа проветривания понижается, что приводит к образованию зон рециркуляционного движения воздуха, в которых накапливаются загрязняющие вещества, в связи с чем необходимо использование мероприятий, позволяющих интенсифицировать естественное проветривание [55,61].

Аэрологическая обстановка может дополнительно изменяться при условии наличия на прилегающей к месторождению территории горного рельефа. Еще одним фактором, оказывающим влияние на розу ветров, является количество бортов, формирующих карьерное пространство. Снижение числа бортов позволяет ограничить объем развивающихся локальных потоков [46].

## **1.2 Анализ факторов, определяющих аэротермогазодинамические условия разработки месторождения полезных ископаемых открытым способом**

### **1.2.1 Горнотехнические факторы**

#### **1.2.1.1 Ориентация и географическое положение карьерного пространства**

Солнечная радиация является основным генератором тепловой энергии для всех термодинамических процессов в воздушной среде карьерного пространства. Процесс рассредоточения тепловой энергии в границах карьера с течением времени демонстрирует те связи, которые характеризуют установившуюся температуру среды и термодинамические процессы воздушных масс в карьерном пространстве [47]. Распределение тепловой энергии по отношению к различным поверхностям в карьерном пространстве зависит от множественного количества факторов, таких как расположение по отношению к стороне света и географическому положению, величина угла наклона по отношению к горизонтальной плоскости, периода времени по отношению к году или суткам, цветовой контрастности. Отличительной особенностью исследуемой плоской поверхности, с величиной угла отклонения от горизонтальной поверхности не более 11 градусов, является то, что ход радиации и суммарная величина варьируется незначительно при задании различных условий ориентаций [48,49]. Таким образом, географическое расположение способствует соответствующему рассредоточению тепловой энергии в карьерном пространстве с учетом значения широты и

долготы, соответствующие исследуемой территории. Также важным условием, определяющим распределение солнечной энергии, является ориентация длинной оси карьера. При расположении длинной оси карьера с запада на восток основное развитие получают северный и южный борты с разными по величине суммами солнечной радиации. При меридиональном простирании длинной оси карьера величина суммарной солнечной радиации для основных слагающих бортов примерно одинакова по величине, но весьма неравномерна во времени. Что касается местных потоков, то они будут западными в первую половину дня и восточными во вторую в соответствии с распределением солнечной радиации в течение дня. В соответствии с этим формирующиеся термодинамические картины будут принципиально различными. При широтном простирании карьера местные потоки, сформированные термодинамическими силами, будут относительно постоянными по направлению (южные) [50,51].

### 1.2.1.1 Конфигурация карьерного пространства

#### 1.2.1.1.1 Система разработки пологих и горизонтальных месторождений

Открытая разработка горизонтальных и пологих пластов полезного ископаемого производится роторными, многочерпаковыми, одноковшовыми экскаваторами и комбайнами с конвейерным, железнодорожным и автомобильным транспортом [62]. Конкретная технология и механизация добычных работ определяется горно-геологическими условиями месторождения, производительностью карьера по полезному ископаемому и технологией вскрышных работ. Добычные работы на горизонтальных и пологих месторождениях при однородном строении пласта выполняются механическими лопатами с фронтальным или нижним черпанием с автомобильным транспортом. Высота добычного уступа обычно равна мощности пласта полезного ископаемого и для производительной работы экскаватора составляет от 4 до 20 м. При мощности пласта менее 4 м полезное ископаемое разрабатывается слоевым способом с рыхлением и штабелированием разрыхленной горной массы бульдозером [63,64]. Из штабеля полезное ископаемое загружается экскаватором или погрузчиком в транспортное средство. Добычные работы на месторождениях с большой мощностью полезного ископаемого производятся с разделением пласта на уступы высотой, соответствующей параметрам выемочно-погрузочной техники. Разработка сложно структурных пластов полезного ископаемого производится селективно многочерпаковыми или фрезерными экскаваторами. На этих месторождениях параметры заходок зависят от мощности, направления и угла падения залежи, а также от типа вмещающих пород. В скальных и полускальных породах блоки по полезному ископаемому и породам обруиваются и взрываются отдельно [65]. Характерный тип

движения воздушного потока, характерный для данного типа месторождения, представлен на рисунке 1.4.

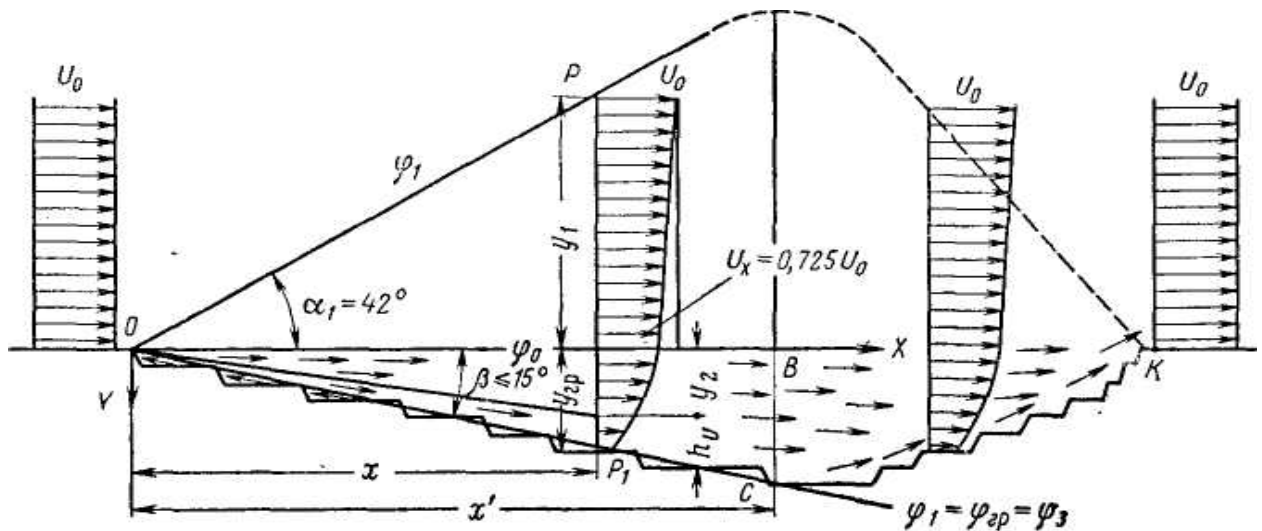


Рисунок 1.4 - Профиль прямоточной схемы движения воздушного потока

Схема движения воздушного потока, представленная на рисунке 1.4, преобладает в период первоначальной стадии отработки месторождения полезного ископаемого открытым способом, а также характерна для условий, когда полезное ископаемое залегает полого или горизонтально. Внешний угол раскрытия свободной струи в сравнении с углом откоса борта карьера равен или больше [66]. Причиной весьма слабого рассеивания в приземном слое является движение на границе свободного потока воздуха с небольшой скоростью. Шероховатость и неровность горизонтальной поверхности на подошве карьера приводит к изменению профиля и характеристик ветрового потока. При прямоточной схеме перемещения потока воздуха с наибольшей интенсивностью омывается наветренный борт карьера за счет поджатия воздушных масс в результате которого возникает приращение (увеличение) скорости [67].

#### 1.2.1.1.2 Система разработки наклонных и крутых месторождений

При разработке наклонных и крутых месторождений горные работы развивают в горизонтальном направлении и в глубину. Горно-подготовительные работы по подготовке уступов к разработке производят в течение всего срока разработки месторождения.

Условия разработки подобных месторождений не позволяют использовать отработанное пространство для размещения пустых пород. Поэтому в этих условиях наиболее часто применяют углубочные и смешанные системы разработки с вывозкой породы во внешние отвалы. Подобные системы разработки используют свыше 50% угольных разрезов, до 85% железорудных карьеров и практически все карьеры цветных металлов. Поскольку затраты на

перевозку горной массы в общей себестоимости добычи полезных ископаемых на глубоких карьерах достигает 60 - 70%. Варианты системы разработки наклонных и крутых месторождений различают в зависимости от вида применяемого транспорта [70].

#### 1.2.1.1.2.1 Система разработки с перевозкой горной массы железнодорожным транспортом

Систему разработки с перевозкой горной массы железнодорожным транспортом применяют на месторождениях с большой протяженностью и при больших объемах перевозок. Систему отличает большое количество транспортных коммуникаций на рабочих площадках и бортах карьеров [71].

Для снижения затрат на содержание железнодорожных путей и путепереходные работы в данных условиях стремятся к максимальной высоте уступа, что обеспечивает минимальное количество рабочих горизонтов. Система разработки характеризуется максимальной шириной рабочей площадки, обеспечивающей размещение всех необходимых буровых, выемочно-погрузочных и транспортных машин, а также развала взорванной горной массы при разработке скальных пород [72]. Скорость увеличения глубины карьера при железнодорожном транспорте также минимальна, зависит от мощности применяемого оборудования и изменяется в пределах от 5 до 15 м/год.

Наиболее часто применяют следующие варианты системы разработки (в зависимости от направления перемещения фронта горных работ на уступах); с продольным однобортовым или двухбортовым; с поперечным однобортовым; с веерным рассредоточенным и с кольцевым периферийным [73]. Характерный тип движения воздушного потока, для рассматриваемой системы разработки месторождения, представлен на рисунке 1.5.

Из рисунка 1.5 следует, что воздушный поток заключенный между прямоточной и рециркуляционной схемой, является промежуточным звеном. Для определённого этапа отработки месторождения данная схема является типичной. Профиль воздушного потока аналогичен прямоточной схеме на прямоточном участке, так как он становится равномерным в процессе сокращения расстояния по отношению к наветренному борту. При рециркуляционно-прямоточной схеме в донной части карьера формируется зона обратных потоков [74].

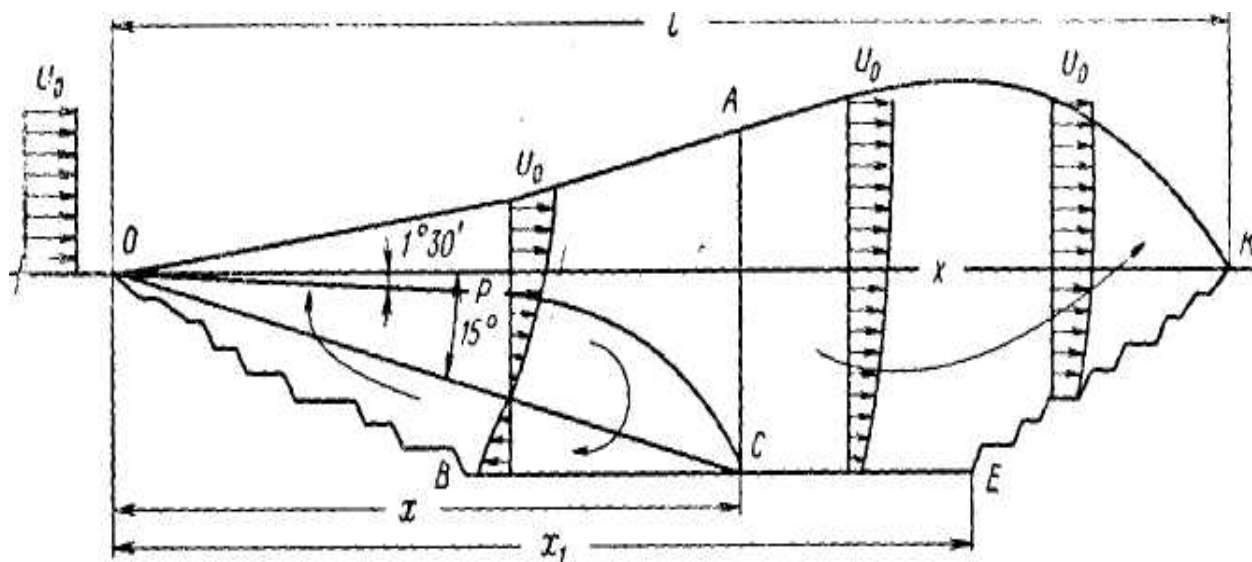


Рисунок 1.5 - Профиль рециркуляционно-прямоточной схемы движения воздушного потока

#### 1.2.1.1.2 Система разработки с перевозкой горной массы автомобильным транспортом

Систему разработки с перевозкой горной массы автомобильным транспортом применяют на месторождениях сложной конфигурации с ограниченными размерами в плане. Основными элементами данной системы разработки являются высота уступа, ширина рабочей площадки, скорость движения фронта работ и скорость увеличения глубины карьера. Высота уступа в этом случае определяется из условия эффективной подготовки горной массы к экскавации, а ширина рабочей площадки может быть уменьшена для сокращения текущего коэффициента вскрыши [75].

Применение автомобильного транспорта по сравнению с железнодорожным позволяет формировать в карьерах зоны концентрации горных работ за счет сокращения экскаваторного фронта, что обеспечивает увеличение производительности выемочно-погрузочного оборудования на 20—25%. Все это позволяет довести скорость увеличения глубины карьера до 25—30 м/год. Наиболее распространенными вариантами системы разработки являются: с продольным одно- или двухбортовым фронтом работ, с поперечным двухбортовым фронтом работ, с веерным рассредоточенным и кольцевым центральным фронтом работ. Характерный тип движения воздушного потока, для рассматриваемой системы разработки месторождения, представлен на рисунке 1.6 [76,77].

Развитие прямоточно-рециркуляционной схемы движения воздушных масс в карьере начинается на уровне кромки участка. В результате ослабления воздушных масс в прямоточной струе возникает понижение скоростных характеристик движения воздушных потоков в донной (по подошве) части карьера, тем самым минимизируется воздухообмен и вынос вредных веществ из рудничной атмосферы [78].

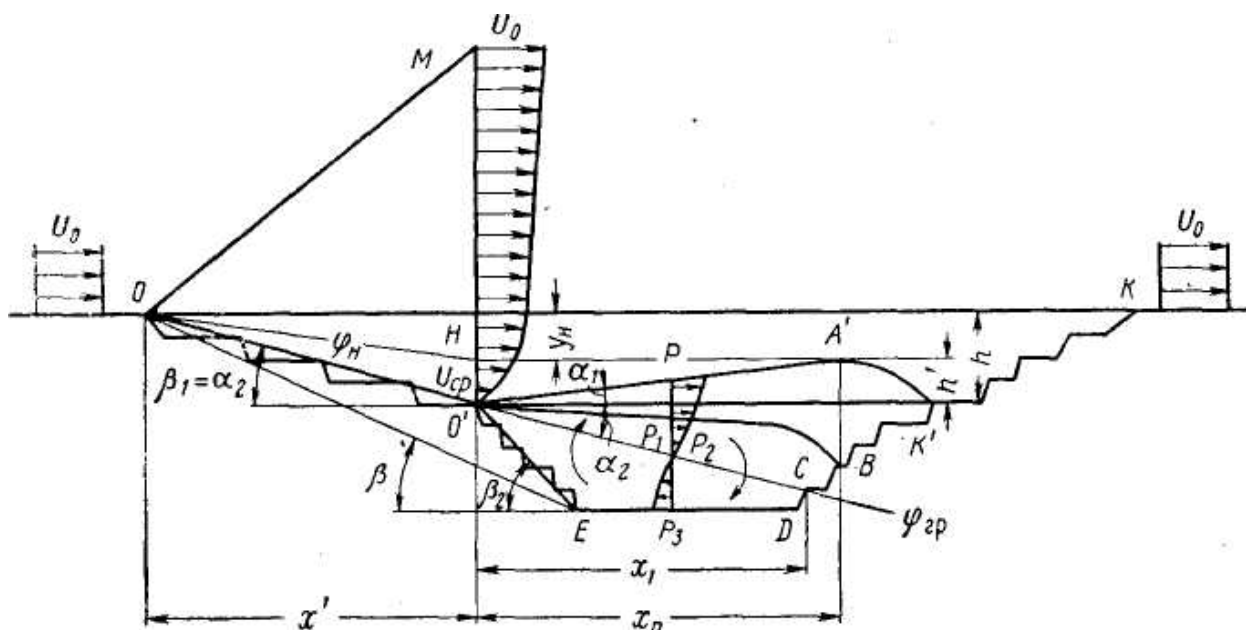


Рисунок 1.6 - Профиль прямоточно-рециркуляционной схемы движения воздушного потока

Согласно схеме, представленной на рисунке 1.6, на уровне верхней части карьера, формируется прямоточное движение воздуха. Вправо стороне от верхней части карьере с противоположным движением ниже неё формируется рециркуляционная схема с вихревым движением. Образование циркуляции воздуха в промежутке между верхней и нижней зоной внешней границы. Основным негативным фактором прямоточно-рециркуляционной схемы является то, что на участке с прямоточным движением перемещение воздуха в зоне рециркуляции обеспечивается ветровым потоком, который с увеличением глубины карьера ослабевает [79,80].

#### 1.2.1.1.2.3 Система разработки с применением комбинированного транспорта

Система разработки с применением комбинированного транспорта применяется на глубоких карьерах и карьерах нагорного типа. В этих случаях в период строительства карьеров и на первом этапе эксплуатации используют автомобильный транспорт, с помощью которого осуществляют наиболее интенсивное развитие горных работ по высоте рабочей зоны [81]. При достижении определенной глубины карьера, когда приближаются к максимально допустимым значениям расстояний транспортирования автотранспортом, осуществляют переход на комбинированные схемы, предусматривающие использование каждого вида транспорта в наиболее благоприятных условиях эксплуатации [82].

Система разработки характеризуется наличием в карьере перегрузочных пунктов, осложняющих ведение горных работ. Поскольку в качестве забойного в большинстве случаев применяют автотранспорт, параметры системы разработки и схемы развития горных работ на

уступах карьера аналогичны системам разработки с применением автомобильного транспорта. Характерный тип движения воздушного потока, для рассматриваемой системы разработки месторождения, представлен на рисунке 1.7.

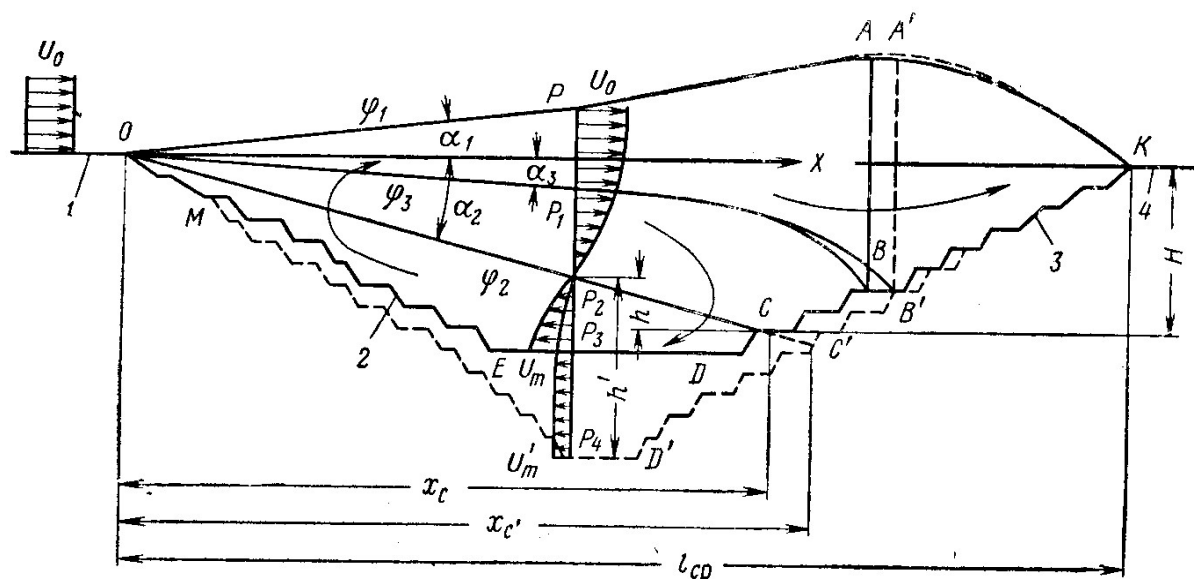


Рисунок 1.7 - Профиль рециркуляционной схемы движения воздушного потока

Схема движения воздушных потоков, представленная на рисунке 1.7, преобладает при условии наличия подветренного борта карьера с углом откосом уступа более 20 градусов. При этом дополнительным условием является воздействие объема прямых потоков на часть карьера. Движение этих потоков сонаправлено с воздушным потоком, протекающим по Земной поверхности. Рециркуляционная и рециркуляционно-прямоточная весьма схожи по структуре, но при этом рециркуляционная характеризуется весьма меньшим участком, на котором перемещение потока сонаправлено с воздушным потоком, протекающим по Земной поверхности. Отличительным критерием рециркуляционной схемы движения воздуха является образование потоков воздуха с обратным движением в донной (по подошве) части карьера. Таким образом, для рециркуляционно-прямоточной схемы движения характерно образование в донной (по подошве) части карьера потоков воздушных масс с прямым или обратным направлением [83,84].

За счет развития карьерного пространства и образование пограничного слоя, движение воздуха осуществляется в виде вихря и происходит деформация объема воздушных масс в пределах карьерного пространства. Скорость потока вдоль верхней границы карьерного пространства равна скорости воздушного потока, протекающего по Земной поверхности, за границами отработки месторождения. Угол наклона внешней границы пограничного слоя, на которой горизонтальная составляющая равная нулю, имеет величину 15-20 градусов. Движение воздуха противоположно направленно по отношению к движению воздушного потока,

протекающего по Земной поверхности, это наблюдается за пределами внешней границы. В итоге формируется циркуляция воздушных масс между вихревым и обратным потоком. Сечение  $P_2P_3$  это зона формирования обратных потоков воздуха, характеризуется максимальной скоростью движения и зависит от геометрических параметров карьера, уровня развития зоны рециркуляции, шероховатости и неровности поверхности и др. Зона обратных потоков имеет отличительные черты, а именно скорость изменчива как по длине, так и по высоте, поэтому воздушный поток приобретает своеобразный профиль в приземном слое и в процессе приближения к внешней границе воздушных масс скорость понижается [85,86].

## **1.2.2 Метеорологические факторы**

### **1.2.2.1 Солнечная радиация в карьере**

Солнечная радиация благодаря тепловой энергии является главным источником, развивающихся в атмосфере термодинамических процессов. С учетом следующих факторов: времени года, географического положения, ориентации в пространстве, окраски горной породы слагающей месторождения, угла наклона и др, обеспечивается соответствующий приток тепловой энергии к той или иной поверхности на участке в карьере [87].

В процессе отработки месторождения происходит соответствующее увеличение глубины карьерного пространства, что влечет за собой к увеличению объема точек (горизонтов), расположенных в карьере, доступных для воздействия радиации образующейся от солнца. Это действие значительно сокращается при условии позднего восхода и раннего захода солнца [90].

В течение разных отрезков года на рисунке 1.8 ясно иллюстрируется различная освещенность, а именно в летний период года разница по освещению верхних и нижних уступов составляет 4-6 часов, а зимний период года – до 8 часов, что влечет к соответствующему притоку тепла на разрабатываемых горизонтах карьера. Если рассматривать весенний и осенний период года, то разница освещенности и тем самым притока тепловой энергии достигает максимальных значений в виде 10 часов. Отличительной особенностью зимнего периода является большая вероятность отсутствия освещенности прямыми солнечными лучами [88,89].

Первым фактором, обеспечивающим неравномерность освещенности соответствующих бортов карьера, является постоянно возрастающая глубина ведения добычных работ в карьере.



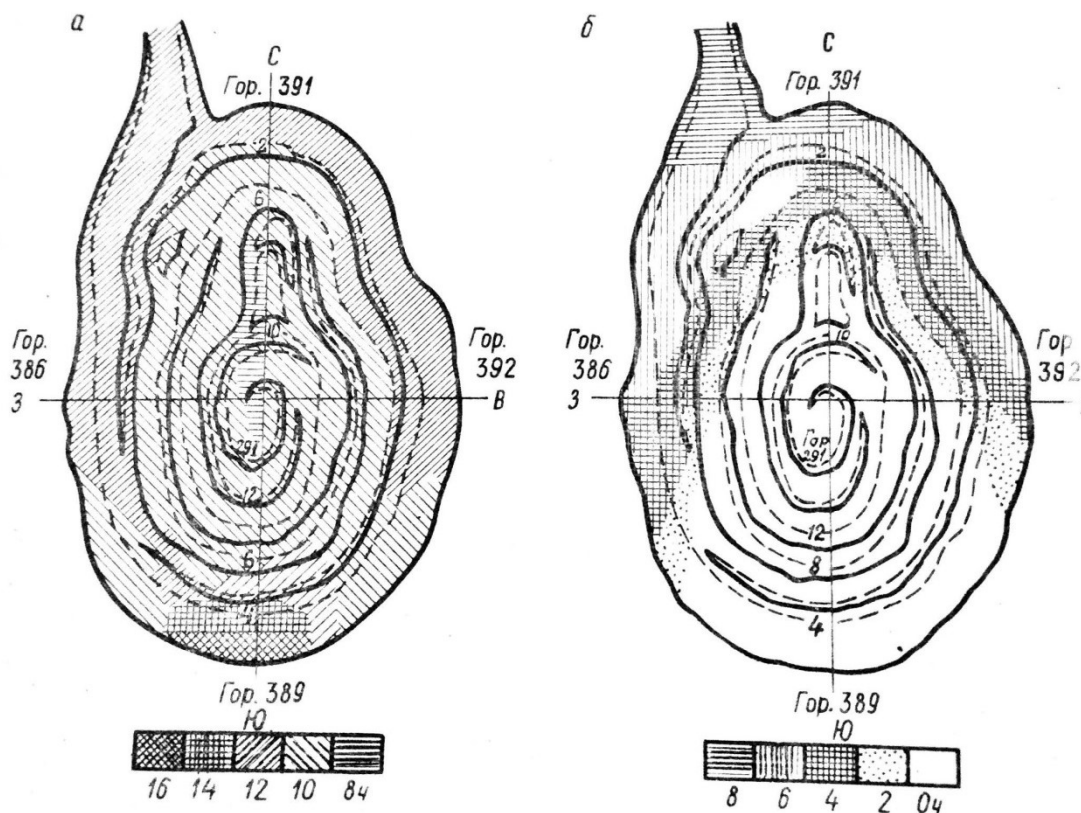


Рисунок 1.8 - Длительность освещения в карьерном пространстве в различные сезоны в году: а – в июле; б – в январе

Вторым фактором является расположение бортов в карьерном пространстве по отношению к соответствующим сторонам света. Например, при условии расположения солнца на не высоком уровне в зимний период времени, приводит к освещённости минимальной площади в карьерном пространстве. Освещению придается только некоторая площадь бортов карьера, а именно та, которая относится к верхним рабочим горизонтам, расположенным на северном, восточном и западном направлении. При этом воздействие солнечных лучей ограничено на площадь уступов, расположенных на южном направлении, в период с августа по апрель, таким образом, южный борт большее количество времени в году находится в тени. В результате, именно южное направление в карьере и его данная часть в меньшей степени получают тепловую энергию [91,97].

Третьим немало важным фактором, является вариативность угла падения на поверхность бортов уступа в карьере лучей солнечной радиации. Например, рассматривая восточное направление в карьере, можно сделать вывод, что на вторую половину дня приходится максимальный объем солнечной радиации, в тоже время разница с западным направлением в карьере составляет всего три часа относительно полудня, таким образом, максимальный объем солнечной радиации приходится на 10 часов утра. При сравнении восточного борта с западным бортом разница между достигнутыми максимальными значениями радиации составляет 5

часов. Наиболее большим объемом притока солнечной радиации подвержен северный борт карьера, в особенности поверхности, имеющие наклон [99].

Если сравнивать период времени в году или сезон, то объем радиации в карьере будет отличным, так, например, на южное направление в карьерном пространстве в период положительных температур количество радиации поступает меньше в 4 раза, чем на северное направление, если же температура отрицательная, то разница может достигать 8 порядков. Одинаковый объем приходится на восточную и западную часть карьера. В связи с различной экспозицией для горизонтов с начальными (начало разработки) и конечными (дно карьера) высотными отметками происходит убывание суммарной тепловой энергии с увеличением глубины карьера, также требуется учитывать временной интервал времени года- лето или зима. Отличительная особенность летнего периода года – на поверхность карьерного пространства поступает прямая солнечная радиация. В зимний же период года, только рассеянную радиацию получают нижние уступы восточного, южного и западного борта [101,103].

Термодинамику воздушных потоков и температурный режим в карьере определяют взаимосвязи, формирующиеся при распределении солнечной энергии по поверхностям. Различие в количестве тепла и неравномерности прогрева поверхности карьера соответствует географическому распределению солнечной радиации.

Разность между собственным излучением и поглощенным называется радиационным балансом, который формируется при распределении солнечной радиации по поверхностям карьерного пространства.

Благодаря радиационному балансу осуществляется определение температуры приземной части воздуха и почвы в диапазоне суточного и годового изменения.

Составной частью теплового баланса является радиационный баланс, который может приобретать положительные и отрицательные значения. Радиационный баланс способствует охлаждению или нагреву приземного слоя воздуха, также определяет направление движения теплового потока [102].

Элемент расположения оси карьера по длинной его стороне является ключевым условием, на основании которого будет осуществляться распределение тепловой энергии от солнечной радиации. При условии простираения с запада на восток длинной оси карьера, основной объем энергии получают южная и северная часть карьера с различными суммарными значениями солнечной радиации. Для восточной и западной части карьера, при условии меридионального простираения длинной оси карьера, суммарный объем тепловой энергии равен по величине, но различен по временным диапазонам. Таким образом, формируются различные термодинамические картины [106].

Местные потоки, формирующиеся термическими силами, при условии широтного простирания карьера, будут постоянным по направлению движения, то есть южное направление. Местные потоки, при условии меридионального простирания карьера по длинной его оси, будут сонаправлены с направлением распределения тепловой энергии, то есть в западном направлении в первую половину дня и в восточном направлении во вторую половину дня. Отрицательным радиационным балансом обладает часть карьера, при условии неравномерного прогрева солнечной радиацией соответствующих бортов карьерного пространства, таким образом, поступающий объем тепла минимален по сравнению с потерями [105,108].

#### 1.2.2.2 Температурный режим почвы и воздуха в карьерах

За счет действия солнечной радиации и тепла, концентрирующейся в глубинной части карьера, формируется термический режим воздуха и почвы. При рассмотрении температурного поля земли можно различить две зоны: геотермозону – за счет образования источников тепла, располагающихся в глубинной части карьера, формируется постоянное распределение температур; гелиозону – объем солнечной радиации, поступающий в карьерное пространство, распространяется на глубину до 30 метров [107].

Поверхности, ограниченные карьерным пространством под воздействием солнечной радиации, прогреваются дифференцированно. Наибольшей температурной величиной обладает северная часть карьера, так как является наиболее прогретой. Такой вывод можно сделать, основываясь на диаграмме, представленной на рисунке 1.9, где изотерма северной части карьера, соответствующая 0 градусов простирается на глубину всего до 0,3 метра, что касается южной части, то там она ниже на порядок [109,110].

На термический режим почвы и взаимодействие ее с приземным слоем воздушного потока оказывает влияние поэтапное изменение рельефа местности в процессе отработки месторождения, вскрытия различных добычных горизонтов, формирование (обнажение) новых поверхностей и изменение их влажности.

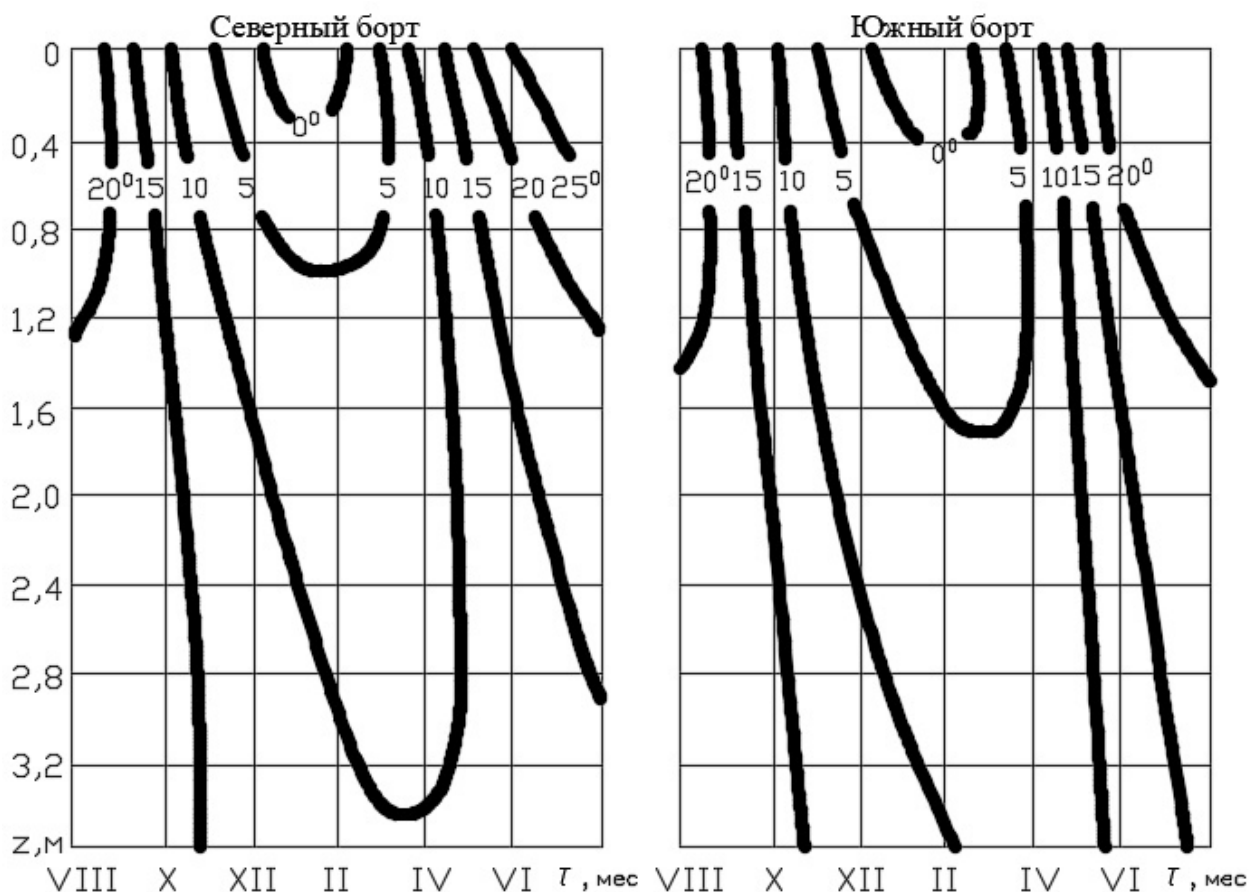


Рисунок 1.9 - Изотерма температуры почвы (Южный и Северный борт карьера)

Для различных периодов года на рисунке 1.10 представлена графическая зависимость суточного хода разности температур между воздушной средой и поверхностью. В случае применения покрытий из различного материала имеющих черный цвет может привести к увеличению температуры на поверхности до 20 градусов. В случае применения покрытий, имеющих светлый цвет характерно наличие пониженных (отрицательных) температур в течении большего времени суток, это позволяет обеспечить выхолаживание приземного объема воздушного потока. Описанные средства позволяют регулировать воздухообмен и распределение тепловой энергии в бортах карьерного пространства [111].

Движение тепловой энергии возможно двух видов: от почвы к воздуху и наоборот. В случае движения тепловой энергии от почвы к воздуху формируются развивающиеся восходящие потоки вследствие повышения температуры воздуха, что способствует транспортировке воздушных объемов в карьере. В случае движения тепловой энергии от воздуха к почве приводит к задержке в нижней части карьера приземного слоя воздуха вследствие охлаждения и тем самым повышения плотностных характеристик по сравнению с вышележащими слоями, таким образом, развивается инверсия [112].

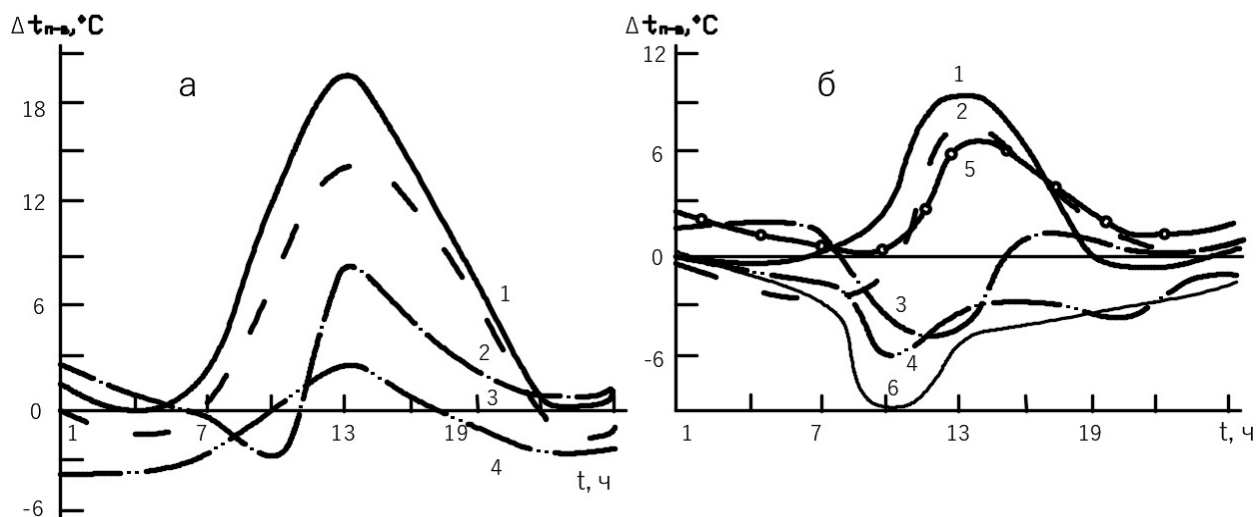


Рисунок 1.10 - Температура между воздухом и поверхностью (суточный ход) для разных периодов времени.

В большинстве случаев турбулентный поток тепловой энергии направлен от воздуха к почве вследствие отрицательной разности температур, что приводит к выхолаживанию приземного объема воздуха. В результате описанный процесс приводит к скоплению и задержке в нижней части карьера охлаждённого приземного слоя воздуха, вследствие чего интенсивность воздухообмена уменьшается. Наличие на дневной поверхности небольшого количества радиационных инверсий при сниженной скорости движения воздушных потоков приводит к более быстрому образованию внутрикарьерных инверсий с увеличенной мощностью вследствие чего, процесс воздухообмена ухудшается и в рудничной атмосфере скапливаются вредные примеси газов [113,117].

Образующиеся местные воздушные потоки в приземном слое воздуха формируются вследствие температурных неоднородностей на различных участках карьера из-за неравномерности нагрева и проявляют себя в наибольшей степени в дневной период времени с развитием южного направления. Что касается зимних периодов года в ночной или пасмурный промежуток времени роль образованных местных потоков внутри карьерного пространства ослаблена [114,115].

### 1.2.2.3 Температурная стратификация атмосферы в карьере

Стратификация атмосферы формирует представление о текущем состоянии воздушной среды за счет демонстрации температуры воздуха на различных участках карьерного пространства. Стратификация атмосферы формируется при протекании процесса массообмена с окружающей карьерной средой, а также при теплообмене воздуха с почвенным слоем [116].

Вследствие периодической изменчивости температурной характеристики воздушных масс в карьерном пространстве, можно выделить четыре основных типа комбинаций изменения температуры, распределяющейся по высоте [118,119,121]:

1) С увеличением глубины разработки месторождения, увеличивается температура воздушных масс на величину, превышающую адиабатический градиент температуры, то есть увеличение температуры на 1 градус при понижении на каждые 100 метров. При этом обеспечивается подъем объема воздушных масс, такое состояние атмосферы характеризуется как неустойчивое.

2) С увеличением глубины разработки месторождения, увеличивается температура воздушных масс на величину, значительно меньше адиабатического градиента температуры. При условии сухого воздуха и изменении температурной характеристики на величину меньше 1 градуса и для влажного на величину меньше 0,6 градуса поддержка вертикальных перемещений не обеспечивается. Такое состояние атмосферы характеризуется как устойчивое.

3) С увеличением глубины разработки месторождения, температура воздушных масс остается постоянной. Такое состояние атмосферы характеризуется как устойчивое.

4) С увеличением глубины разработки месторождения, уменьшается температура воздушных масс, такое состояние атмосферы характеризуется как инверсионное, при этом объем воздушных масс, располагающийся по вертикали, носит устойчивый характер.

Таким образом, можно выделить два основных типа стратификации, это устойчивый и неустойчивый. Скопление вредоносных газовых веществ и пыли в воздухе, располагающегося в пределах карьерного пространства, вызвано устойчивой стратификацией. В таком случае, при длительном сохранении текущего состояния, это может привести к накоплению концентраций вредных примесей, превышающих предельно-допустимые значения [120,125].

#### 1.2.2.4 Скорость движения воздушного потока по Земной поверхности

Воздушная среда в карьере характеризуется целым комплексом факторов. Одним из ключевых параметров является скорость движения воздушных потоков. Их формирование обосновывается воздействием на них внешних факторов, таких как энергия ветрового потока, который перемещается вдоль поверхности на уровне верхней отметки карьера, и энергия локальных циркуляций, которые образуются в случае неравномерного распределения температуры по глубине. Для классификации воздушного потока в карьере можно использовать его относительную величину, которая есть отношение абсолютного значения скорости к скорости ветрового потока на Земной поверхности. В карьерах с углами откоса бортов менее 20 градусов направление движения ветрового потока совпадает с его вектором на поверхности.

Основываясь на принятой классификации типов движения воздушных потоков, данное условие можно классифицировать как тип с прямоточной схемой движения воздушных масс в карьере, это означает, что вектор общего ветрового потока совпадает с направлением движения воздушных масс в карьере. С увеличением глубины ведения добычных работ и ростом угла откоса уступа, величина которого начинает превышать 25 градусов, возможно образование потенциально опасных зон рециркуляционного движения воздушных масс, в которых движение воздуха обратное относительно направления движения основного потока воздуха на Земной поверхности. Рециркуляционная зона характеризуется относительной величиной скорости ветрового потока в карьерном пространстве, максимальное значение которого не превышает 0,4, а среднестатистический показатель равен 0,27 скорости ветрового потока на Земной поверхности [144].

На рисунке 1.11 представлен график вариативности величины скорости ветрового потока в карьере в зависимости от его значения на поверхности. При скорости ветрового потока более 4-5 м/с действия местных потоков на результирующую скорость ветрового потока в карьерном пространстве снижается, что подтверждается минимальными изменениями скорости по вертикали на графике. Результирующая скорость характеризуется энергией ветрового потока, протекающего по Земной поверхности. Также этой энергией определяется величина динамических сил, которые характеризуют закономерности формирования направления движения ветрового потока.

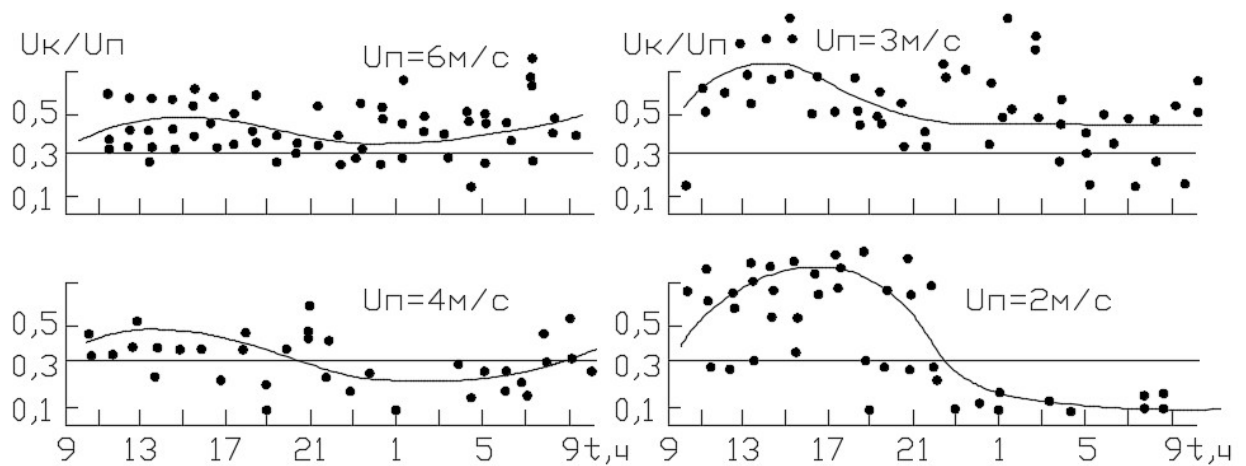


Рисунок 1.11 – Динамика изменения скорости с течением времени

#### 1.2.2.5 Период времени ведения добычных работ в карьере

Немало важным фактором, оказывающим влияние на формирование аэродинамических процессов в карьере, является исследуемый период времени. Так, например, можно отметить закономерность в изменении величины относительной скорости воздушного потока в дневное и

ночное время суток. Зачастую, для дневного времени суток характерно максимальное значение скорости, для остального периода времени (ночь, утро, вечер) – это значение минимально. Описанные условия подтверждаются полученной зависимостью изменения относительно скорости ( $\Delta U$ ) от мощности и распространения солнечной радиации, образующей определенный температурный режим, устанавливающийся в карьерном пространстве. Дневное время суток также характеризуется максимальным притоком тепловой энергии, которое оказывает непосредственное воздействие на северную часть карьера, таким образом, обеспечивая образование локальных потоков в основном Южного направления. Взаимодействие двух исследуемых потоков, а именно локального и потока, сформированного энергией воздушного потока, движущегося по земной поверхности, приводит к образованию суммарного потока или результирующего, обладающего своими значениями ключевых параметров, таких как скорость, направление, температура и др.

Основываясь на графической зависимости, представленной на рисунке 1.12, скорости воздушного потока и температуры окружающей среды с течением времени в рамках года, можно заметить определенную неопределенность.

Рассматривая период времени (зима), где преобладают отрицательные значения температур, можно отметить, что динамика колебаний относительной скорости ветрового потока в рамках суток незначительна и слабо выражено максимальное значение в дневной период времени. Это обосновывается снижением степени влияния локальных потоков вследствие спада интенсивности и длительности воздействия солнечной радиации, так как исследуемый период характеризуется меньшим количеством солнечных дней, а также значительного снижения объема тепловой энергии, поступающего к почвенному слою из-за присутствия снежного покрова на Земной поверхности. Величина относительной скорости ветрового потока приближена к значению  $\Delta U = 0,3$ . Проявляющиеся изменения, проиллюстрированные на графической зависимости, в ту или иную сторону, обосновываются некоторым проявлением термодинамических сил и изменчивым направлением движения ветрового потока в дневной период времени [145].



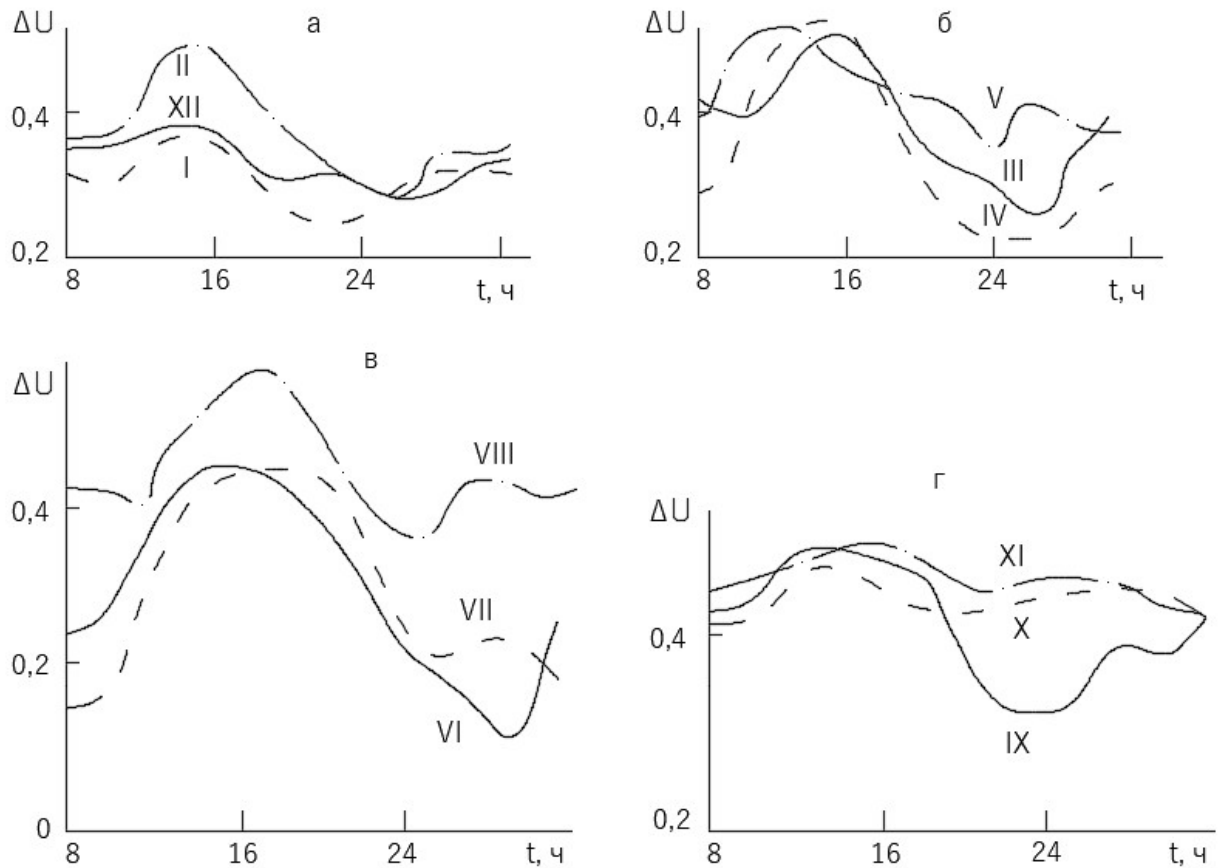


Рисунок 1.12 - Характер изменения относительной скорости  $\Delta U$  ветрового потока в карьере в разные месяцы года и суток

Так, например, месяца, относящиеся к весеннему периоду года, характеризуются повышением значения относительной скорости ветрового потока в карьерном пространстве до величины на порядок больше значения  $\Delta U$ , которое формируется воздушным потоком, протекающим по Земной поверхности. Что касается месяцев, относящихся к осеннему периоду года, характеризуются большей неоднородностью по сравнению с другими периодами. С одной точки зрения, как было отмечено выше, отдельные участки и борта карьера прогреваются неравномерно в связи с большим количеством неясных дней, однако, с другой стороны, это обеспечивает снижения объема потока солнечной радиации. В рассматриваемый период с течением времени снижается значение относительной скорости ветрового потока до величины, соответствующей зимнему периоду года [146].

### 1.3 Методы нормализации параметров рудничной атмосферы в карьерном пространстве

#### 1.3.1 Методы искусственной вентиляции в карьере

##### 1.3.1.1 Крутонаклонный подъемник и трубопроводы для подачи свежей струи в застойные зоны

Различные золоторудные месторождения, обрабатываемые открытым способом, имеют свою сложную коммуникацию и ряд особенностей, связанных с разработкой месторождения. Одной из таких особенностей является наличие наклонной подъемной установки, представленной на рисунке 1.13, располагающейся на одном из бортов карьера. Таким образом, сторона карьера с наличием наклонной подъемной установки становится не рабочей и появляется проблема в расширении и развитии карьерного пространства в процессе отработки месторождения, становятся сложнее транспортировочные коммуникации, схемы организации водоотлива на карьере и ухудшается способность нормализации рудничной атмосферы естественным способом проветривания, требуется прибегать к различным методам (приспособлениям) для обеспечения искусственной вентиляции [62].

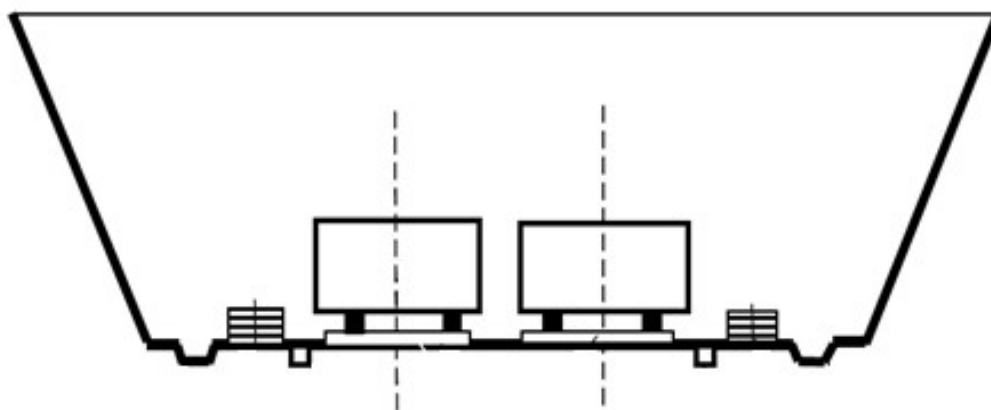


Рисунок 1.13 - Расположение оборудования наклонного скипового подъемника в крутой траншее

На нерабочем борту карьера крутонаклонная траншея может решить несколько вопросов связанных с обеспечением аэрологической безопасности после проведения различных технологических процессов, которые формируют выброс загрязняющих веществ, и водоотведением паводковых вод в период положительных температур, таким образом, что позволит обеспечить прокладку водоотливных и вентиляционных трубопроводов вдоль трассирования траншеи. Такой способ будет затруднителен, но экономически целесообразен, чем организация стационарных установок в различных местах. Как один из вариантов, размещения трубопроводов, направленных на водоотведение и проветривание, представлен на рисунке 1.14. Водоотводные трубы размещаются в промежутке между двумя рельсовыми путями, а вентиляционные, по причине их малого веса, располагаются по специально подготовленным опорам на верхних кромках траншеи [63].

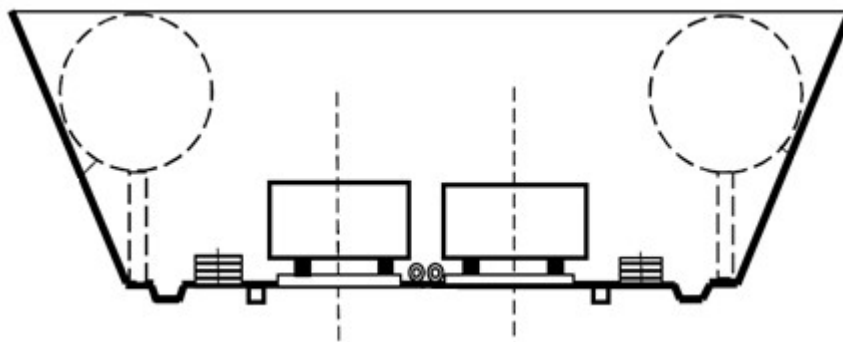


Рисунок 1.14 - Вариант расположения в крутонаклонной траншее с карьерным подъемником специализированных трубопроводов для отвода воды и загрязненного воздуха

На первичных этапах отработки месторождения, когда глубина не достигает больших величин, проветривание обеспечивается за счет преобладающей прямоточной схемы, которая относится к естественному методу. То есть поток воздуха, пересекающий карьерное пространство, обеспечивает нормализацию рудничной атмосферы за счет выноса части вредных веществ за пределы границ рабочего пространства и снижения концентрации вредных примесей. При дальнейшей отработке, глубина месторождения увеличивается и начинает преобладать прямоточно-рециркуляционная схема. Таким образом, начинают образовываться участки, проветривание которых затруднительно, поэтому для них требуется прибегать к дополнительным средствам, относящиеся к искусственному методу нормализации атмосферы. Метода нагнетания воздушной струи при помощи трубы, проложенной по наклонной подъемной траншее, позволит обеспечить нормализацию концентрации рудничных газов за счет создания турбулентных потоков, которые будут взаимодействовать с прямоточной схемой в верхних горизонтах карьера и благодаря такой циркуляции будет достигнут требуемый результат в концентрации вредоносных веществ соответствующей нормам ПДК. Принципиальная схема представлена на рисунке 1.15 [65].

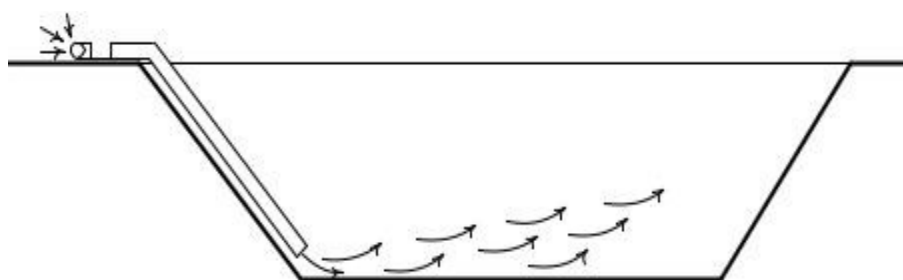


Рисунок 1.15 - Метода нагнетания воздушной струи при помощи трубы

### 1.3.1.2 Подземные горные выработки для подачи свежей струи в застойные зоны

Нормализация рудничной атмосферы при отработке месторождения возможно при использовании подземных горных выработок. Способ является дорогостоящим, со

значительными капитальными вложениями на сооружение системы. Его стоит рассматривать при условии комбинированной (открыто-подземной) разработки месторождения полезного ископаемого путем создания и использования вентиляционных восстающих расположенных на уровне дна карьера или воздухопадающих штолен, располагающихся на одном из бортов карьера. На первоначальных этапах отработки проветривание карьерного пространства обеспечивается за счет естественных вихревых потоков. В процессе углубления образуются два вихря представленные на рисунке 1.16. Большой располагается в верхних слоях карьерного пространства, а малый в нижних слоях и имеет противоположно направленное движение. В результате создаются зоны, вынос вредных веществ из которых невозможен для обеспечения полноценной и производительной работы [67].

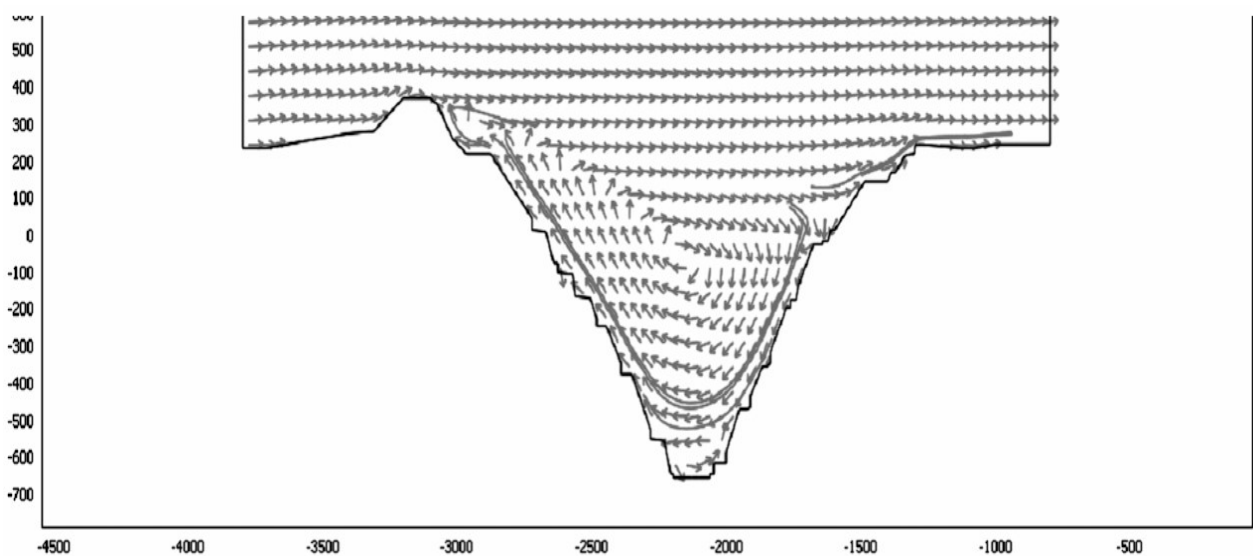


Рисунок 1.16 - Распределение воздушного потока в карьерном пространстве при естественном проветривании

Благодаря нагнетанию воздушных масс за счет вентиляционных восстающих расположенных в донной части карьера обеспечивается интенсивное изменение структуры (скорости) воздушных потоков в границах карьера. При разных величинах скорости движения воздуха малый вихрь у дна карьера разделяется и тем самым повышается количество восходящего воздуха с различной структурой (скоростью), что в свою очередь нормализует рудничную атмосферу и увеличивается объем крупного вихря в верхней границе карьера, но при этом потоки воздуха, движущиеся в прибортовой зоне карьера, по-прежнему являются сложно проветриваемыми участками, где скорость поток воздуха низкая. При условии расположения штолен в донной части карьера в прибортовой зоне, то также обеспечивается нормализация за счет изменения структуры (скоростей), что способствует выветриванию вредных веществ [68,69].

## 1.3.2 Методы борьбы с пылеобразованием в карьере

### 1.3.2.1 Искусственное генерирование осадков

Одним из способов пылегазоподавления в карьере является применение искусственного генерирование снежных осадков. Климатическим условием применения этого метода является отрицательные температуры. Следующим этапом является распыление определённой массы диспергированной жидкости (воды) при помощи вентилятора, установленного на специализированном автомобиле. Установка представлена на рисунке 1.17.

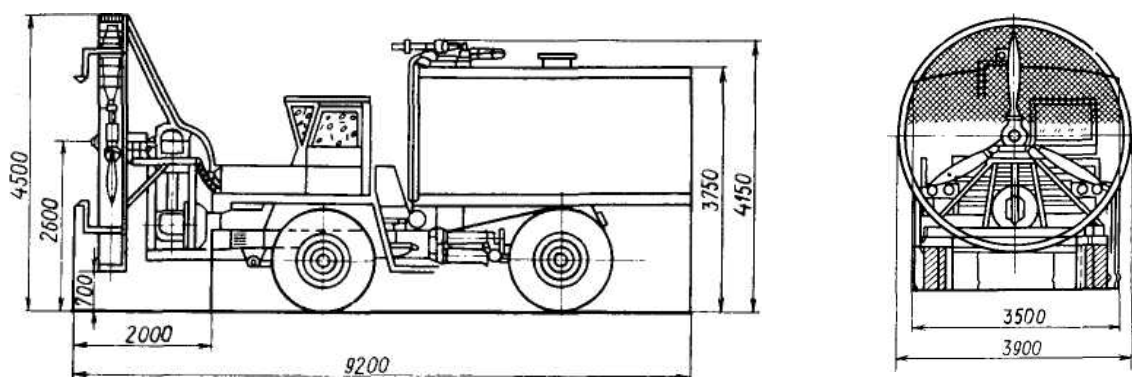


Рисунок 1.17 - Схема оросительно-вентиляционной установки НК-12КВ

При выполнении описанных выше действий возникает изменение параметров струи: концентрация капель, степень насыщенности паром, температура вследствие взаимодействия с объемом воздуха, теплообмена и выпадения части капель из струи. В процессе интенсивного тепломассообмена струи с холодным воздухом, часть струи охлаждается вследствие отдачи тепла, другая часть испаряется, обеспечивая насыщением воздуха в струе водяным паром. Основной объем капель из водяного потока начинает двигаться вниз, где преобладают воздушный поток с ламинарным типом движения. В процессе движения, капли в жидком агрегатном состоянии приобретают нулевое значение температуры по Цельсию, далее же агрегатное состояние меняется, и капли начинают твердеть и кристаллизоваться, тем самым образуется объем снежинок. В зависимости от метеоусловий и высоты падения будет происходить коагуляционный или сублимационный рост снежинок, вследствие чего, параллельно с этим процессом, обеспечивается вынос загрязняющих веществ за границы карьера. Такой эффект связан с наличием у снежинок адгезионной способности [71].

### 1.3.2.2 Создание водяной завесы

С целью интенсификации проветривания карьерного пространства существует метод нормализации рудничной атмосферы за счёт обеспечения разных плотностей воздуха, который протекает внутри карьера и формирует воздушную атмосферу.

Изменение плотностных характеристик воздуха происходит за счет прохождения его через распыленную струю как холодной, так и горячей воды. Данный процесс представлен на рисунке 1.18.

Метод предназначен для периода времени с положительными температурными характеристиками, вследствие чего, воздушный поток, преодолевая начальную границу формирования карьера, попадает под действие искусственно созданной водяной завесы, которая образуется при помощи распыления, при этом вода имеет отрицательную температуру или близкую к нулю. Это в свою очередь обеспечивает рост барометрического давления и плотностных характеристик в результате повышения влажности воздуха. Охлаждённый воздух по своим физико-химическим свойствам начинает опускаться на нижележащие обрабатываемые горизонты карьера, далее он попадает в следующую водяную завесу, формирующуюся за счет распыления горячей воды, вследствие чего обеспечивается падение барометрического давления и понижение его плотности, таким образом, благодаря своим физико-химическим свойствам, он начинает двигаться вверх [75].

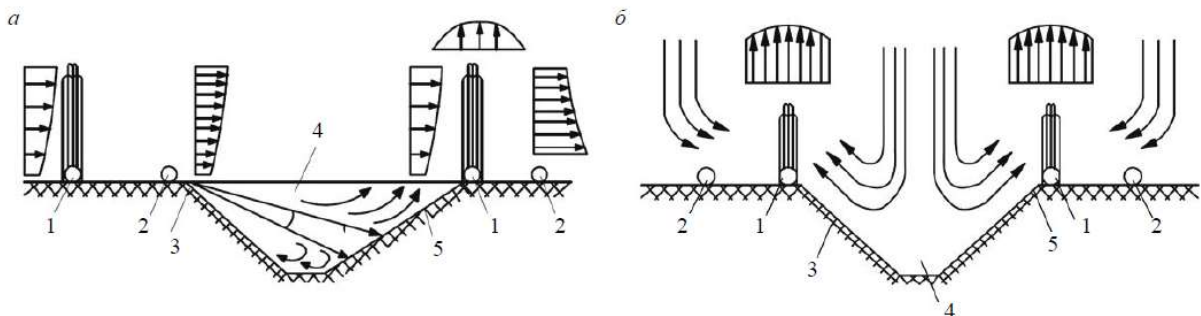


Рисунок 1.18 - Эпюры ветровых потоков, пропускаемых через водяные завесы в теплый период года (а), в холодный период года и в период атмосферных инверсий (б)

1 – трубопровод горячей воды; 2 – трубопровод холодной воды; 3 – подветренный борт карьера;  
4 – карьерное пространство; 5 – наветренный борт карьера

В период года с отрицательными температурами (в период температурной инверсии) для обеспечения требуемого уровня ПДК в атмосфере, необходимо организовать в карьерном пространстве конвективное движение воздушной струи с возможностью обмена воздушных масс с воздухом, располагающимся за пределами карьерного пространства. Такой процесс возможен при распылении водяной струи с положительным значением температуры по всему периметру верхней границы формирования карьерного пространства. Такого рода циркуляция

воздушных потоков внутри карьерного пространства обеспечивает нормализацию рудничной атмосферы после проведения различных технологических работ связанных с выбросами вредоносных и загрязняющих веществ.

Еще одним преимуществом данного способа (распыление водяной струи) является нормализация рудничной атмосферы по пылевому фактору, то есть струя воды смачивает и тем самым осаждает частицы пыли на бермы и откосную часть поверхности карьера. Это является достоинством по отношению к использованию различных средств пылеулавливания, таких как вентиляторы, циклоны для очистки от твердых частиц [79].

### 1.3.2.3 Солнечная радиация для нагрева застойных зон

Один из экономичных и эффективных способов нормализации рудничной атмосферы за счет интенсификации конвективных потоков внутри карьерного пространства возможен благодаря использованию солнечной энергии, которую можно использовать при помощи цельного или разделённого на сектора плоского зеркала, установленного в карьере на поверхности верхнего уступа. Принципиальная схема оборудования представлена на рисунке 1.19. Выбор геометрических параметров зеркала зависит от геометрических параметров карьера, а именно глубины и ширины карьерного пространства. Согласно опытно-промышленным испытаниям с увеличением глубины карьера растет и площадь зеркала, требуемого для прогрева. В целях регулирования положения зеркала данное оборудование оснащено специальным шарниром [123].

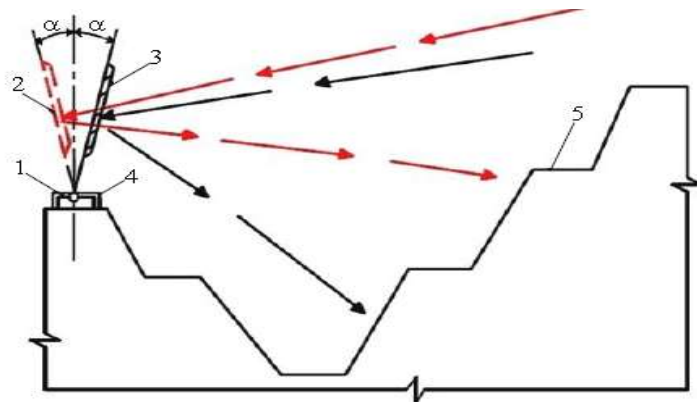


Рисунок 1.19 - Прогрев карьерного пространства цельным зеркалом

1 – шарнир; 2 – мачта; 3 – зеркало; 4 – платформа; 5 – карьерное пространство

Месторасположение на борту карьерного пространства и его положение относительно вертикальной и горизонтальной оси обеспечивает использование солнечной энергии для повышения плотностных характеристик воздушных потоков теневых бортов и днища в течение светлого времени суток. Данный метод обеспечивает формирование конвективных потоков

благоприятно сказывающихся на обеспечение ПДК вредных и загрязняющих газов в атмосфере. Одним из отличительных преимуществ использования зеркала является более качественный прогрев воздушных участков внутри карьерного пространства, которые являются труднодоступными из-за своих геометрических характеристик и расположения. Также исключается процесс ослабления конвективных потоков при взаимодействии с непрогретым воздухом на теневых поверхностях. При определенном наклоне зеркала, а именно противоположно карьерному пространству осуществляется очистка его от загрязнений, которые образовались на отражательном элементе [123,124].

#### 1.4 Выводы по Главе 1

1. Ключевыми факторами, оказывающими непосредственное влияние на формирование аэродинамических полей в карьере, являются термодинамические и химические параметры рудничной атмосферы, которые включают в себя метеорологические условия воздушной среды, геотехнические характеристики горной породы, слагающей месторождение, конфигурация карьерного пространства и его ориентация на местности.

2. Географическая ориентация карьерного пространства определяет характер рассредоточения тепловой энергии по поверхности, в результате чего формируется термодинамическая картина. При меридиональном простирании длинной оси карьера местные потоки будут западными в первую половину дня и восточными во вторую. В случае широтного простирания карьера местные потоки будут относительно постоянными по направлению (южные). В соответствии с этими условиями в карьерном пространстве будут формироваться принципиально различные термодинамические картины.

3. В карьерном пространстве преобладают четыре основных схемы движения воздушных потоков: прямоточная, прямоточно-рециркуляционная, рециркуляционно-прямоточная, рециркуляционная. Каждая из схем зависит от конфигурации карьерного пространства, которая в свою очередь зависит от формы и угла залегания рудной залежи. Таким образом, чем круче угол наклона полезного ископаемого, тем глубина нижней отметки карьера увеличивается. В результате возрастает вероятность формирования рециркуляционной схемы движения воздушных масс, которая характеризуется образованием застойных зон, потенциально опасных для накопления загрязняющих и вредных примесей.

4. Неотъемлемой частью развития месторождения является образование температурной стратификации, которая формируется под воздействием солнечной радиации, температуры воздуха и почвы, а также скорости движения воздушных потоков. В результате установившаяся стратификация характеризуется тепловым балансом, который приобретает как положительные,



так и отрицательные значения. В зависимости от его величины выделяются два основных типа атмосферы: устойчивая и неустойчивая. Образование скопления вредоносных газовых веществ и пыли в воздухе, располагающегося в пределах карьерного пространства, вызвано именно устойчивой стратификацией, поэтому при длительном сохранении текущего состояния это может привести к накоплению концентраций вредных примесей, превышающих предельно-допустимые значения.

5. Отрицательные температуры в районах Крайнего Севера благотворно сказываются на геомеханической составляющей месторождения, то есть с понижением температуры происходит увеличение прочностных свойств горной породы, а именно крепости, модуля упругости, твердости, а также происходит снижение пластических и реологических характеристик. Но имеют место быть и положительные температуры на короткий период времени, которые способствуют образованию переменных температур рудничного воздуха. Переменные температуры осуществляют влияние в виде формирования процесса замерзания – оттаивания верхних слоев породы, вследствие чего это может привести к интенсивному выветриванию, снижению прочности вплоть до полной дезинтеграции.

6. В мире разработаны различные методы нормализации параметров рудничной атмосферы в карьере после проведения ряда технологических операций, и все они имеют как положительные, так и отрицательные стороны. Так, например, применение вентиляционных установок возможно, но и в тоже время затруднительно. Применение данного метода оказывает непосредственное влияние на увеличение эксплуатационных и капитальных затрат предприятия. Наиболее экономически целесообразным методом является изменение ландшафтного рельефа или геометрии карьерных уступов, что позволит минимизировать сопротивление при движении воздушных потоков. Однако, в большинстве случаев из-за большой глубины карьеров различные методы сложны в реализации на соответствующих этапах отработки по причине отсутствия сведений, регламентирующих использования определенного метода на определенной глубине.

7. На степень загрязнения в карьере также оказывает влияние температурная инверсия. При этом в наибольшей степени интенсивность загрязнения атмосферы возрастает при условии формирования инверсии типа приземная или приподнятая. Зачастую загрязнение представлено концентрацией загрязняющих примесей в приземном воздушном слое, величина которых превышает предельно допустимые концентрации. Наиболее сложными инверсиями являются те, которые распределяются по всему объему карьера и тем самым создают условия, при которых наиболее затруднительно использование естественного метода воздействия для организации аэрологической безопасности.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В КАРЬЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

### 2.1 Аналитический метод исследования воздушной среды в карьере

Комплекс мероприятий по нормализации воздуха при развитии месторождения базируется на анализе режимов естественного воздухообмена в выработанном пространстве в течение всего времени ведения горных работ, в основном, за счет энергии ветрового потока. Это связано с огромным масштабом горных выработок. Средний карьер характеризуется объемом выработанного пространства более 50 млн. м<sup>3</sup>. По мере углубления карьера возникает необходимость в интенсификации естественного воздухообмена и применении средств искусственной вентиляции [21].

Основными источниками загрязнений атмосферы карьера являются работающая горная и транспортная техника (экскаваторы, автосамосвалы и др.), а также последствия взрывных работ (пылегазовое облако, газовыделение из взорванной горной массы).

#### 2.1.1 Расчет естественного проветривания карьера и определение структуры проветривания рабочей зоны карьера

Проектирование вентиляции в карьере начинается с анализа возможных схем движения воздушных потоков за счет энергии ветрового потока. Выделяют следующие основные схемы: прямоточные (направление движения воздуха в выработанном пространстве карьера или в верхней его части совпадает с направлением ветрового потока на поверхности) и рециркуляционные (направление воздушного потока в нижней части карьера существенно отличается от направления ветрового потока на поверхности) [31].

С точки зрения нормализации атмосферы карьера предпочтительны прямоточные схемы, так как в этом случае вредности сразу удаляются из выработанного пространства карьера. При реализации рециркуляционных схем происходит разбавление вредностей в нижней части карьера, а удаление их из карьера возможно лишь за счет турбулентной диффузии в зону прямых потоков воздуха. В любом случае концентрация вредностей в атмосфере карьера определяется расходом воздуха.

Тип схемы движения воздушных потоков в карьере определяется отношением  $H/L_n$ , где  $H$  - глубина карьера;  $L_n$  - длина карьера по поверхности в направлении проветривания. По мере разработки месторождения изменяются параметры  $H$  и  $L_n$ , следовательно, и схемы движения воздушных потоков. В зависимости от значения отношения  $H/L_n$  расход воздуха вычисляется

для 3-х этапов развития карьера по соответствующей формуле [52]. Принципиальные схемы для каждого рассматриваемого этапа развития карьера представлена на рисунке 2.1-2.3.

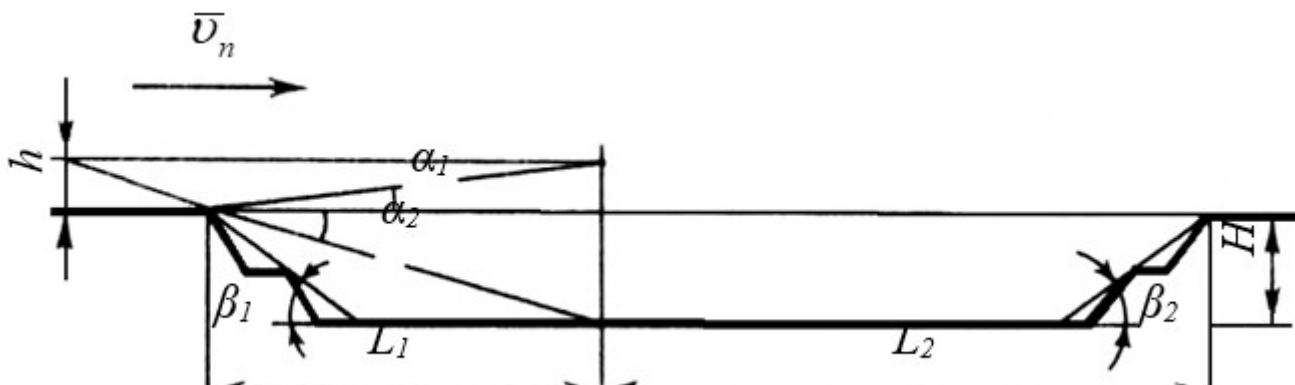


Рисунок 2.1 - Схема к расчету расхода воздуха на I – ом этапе развития карьера

**I этап.** Соответствует условию  $H/L_n \leq 0,1$ , где  $L_n = L_1 + L_2$ . Согласно схеме для расчета, представленной на рисунке 2.1.

На этом этапе в карьере преобладают прямоточные и рециркуляционные схемы движения воздуха.

Расход воздуха на участке  $L_1$  рассчитывается по формуле (2.1):

$$Q_1 = \bar{v}_n h b_1, \quad (2.1)$$

где  $\bar{v}_n$  - средняя скорость ветрового потока на поверхности в слое толщиной  $h$ ,

$h$  – толщина движущегося воздушного потока по Земной поверхности,

$b_1$  - ширина карьера на участке  $L_1$ .

Толщина слоя рассчитывается по формуле (2.2):

$$h = H \operatorname{tg} \alpha_1 / \operatorname{tg} \alpha_2 = 0,48 H, \quad (2.2)$$

где  $H$  - глубина карьера,

$\alpha_1, \alpha_2$  - эмпирическая величина, характеризующая угол раскрытия свободной струи, которая равен  $\alpha_1 = 7^{\circ}20'$ ,  $\alpha_2 = 15^{\circ}$ .

Расход воздуха на участке  $L_2$  рассчитывается по формуле (2.3):

$$Q_2 = \gamma k \bar{v}_n L_2 b_2, \quad (2.3)$$

где  $\gamma$  - коэффициент, учитывающий изменение скорости ветрового потока,

$k$  - коэффициент, учитывающий турбулизацию потока,

$\bar{v}_n$  - средняя скорость ветрового потока на поверхности в слое толщиной  $h$ ,

$L_2$  – длина участка карьера,

$b_2$  - ширина карьера на участке  $L_2$ .

Причем  $\gamma = 0,67$ ,  $k = 0,129$ .

Из схемы, представленной на рисунке 2.1, следует, что длина участка карьера  $L_2$  рассчитывается по формуле (2.4):

$$L_2 = L_n - H \operatorname{ctg} \alpha_2 \quad (2.4)$$

где  $L_n$  – длина откосной части карьера,

$H$  - глубина карьера,

$\alpha_2$  - эмпирическая величина, характеризующая угол раскрытия свободной струи, которая равен  $\alpha_2 = 15^\circ$ .

Полный расход воздуха рассчитывается по формуле (2.5):

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (2.5)$$

где  $Q_1$  - расход воздуха на участке  $L_1$ ,

$Q_2$  - расход воздуха на участке  $L_2$ ,

**II этап.** Соответствует условию  $0,1 < H/L_n < 0,2$ . Схема для расчета представлена на рисунке 2.2. Проветривание карьера происходит преимущественно по рециркуляционной схеме. Однако формулы (2.1 - 2.5) справедливы и в этом случае.

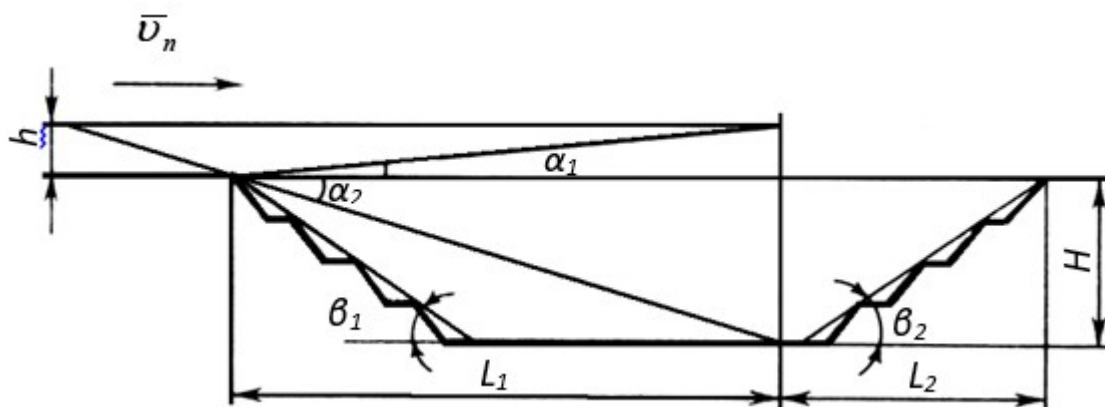


Рисунок 2.2 - Схема к расчету расхода воздуха на II – ом этапе развития карьера

**III этап.** Соответствует условию  $H/L_n \geq 0,2$ . Схема для расчета представлена на рисунке 2.3.

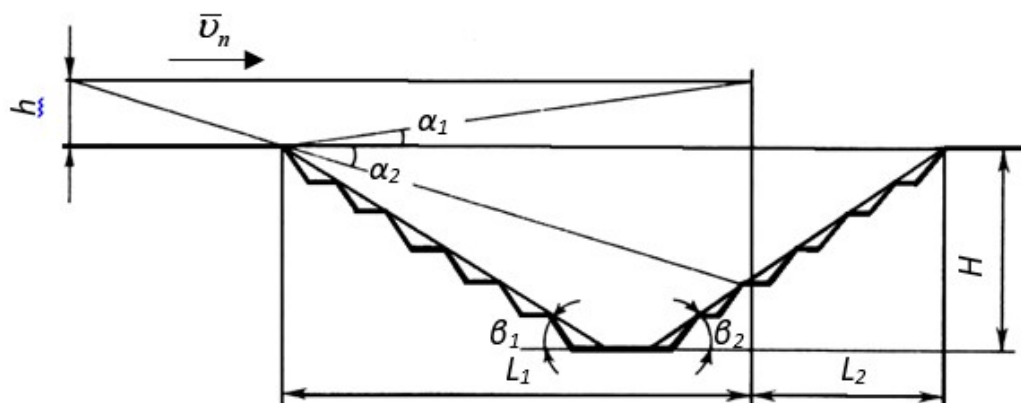


Рисунок 2.3 - Схема к расчету расхода воздуха на III– ом этапе развития карьера

Толщина слоя рассчитывается по формуле (2.6):

$$h = 0,482 L_n / (3,73 + \operatorname{ctg} \beta_2) \quad (2.6)$$

где  $L_n$  – длина откосной части карьера,

$\beta$  - угол раскрытия струи в вертикальной плоскости.

Из схемы, представленной на рисунке 2.3, следует, что длина участка карьера  $L_2$  рассчитывается по формуле (2.7):

$$L_2 = L_n \operatorname{tg} \alpha_2 / (\operatorname{tg} \alpha_2 + \operatorname{tg} \beta_2) \quad (2.7)$$

где  $L_n$  – длина откосной части карьера,

$\alpha_2$  - эмпирическая величина, характеризующая угол раскрытия свободной струи, которая равен  $\alpha_2 = 15^\circ$ ,

$\beta$  - угол раскрытия струи в вертикальной плоскости.

Расход воздуха вычисляется по формулам (2.1), (2.3) и (2.5) с учетом выражений (2.6) и (2.7).

### **2.1.2 Расчет вентиляции карьера при наличии внутренних источников вредностей в виде работающей горной и транспортной техники**

По месторасположению относительно карьера источники вредностей делятся на внешние (отвалы, склады руды, обогатительные фабрики, грунтовые дороги и др.) и внутренние (работающая горная и транспортная техника, выделение вредных газов из горных пород и др.).

С точки зрения загрязнения атмосферы карьера наибольшую опасность представляют внутренние источники. Особенно те, которые расположены на площадках нижних уступов в зоне действия рециркуляционных воздушных потоков [122].

Неблагоприятная метеорологическая обстановка (инверсионная или адиабатическая стратификация атмосферы карьера) способна привести к заметному локальному накоплению вредностей. Подобная ситуация позволяет рассмотреть возможность применения ветровых установок для проветривания рабочих зон карьера, например, экскаваторных забоев.

Необходимое количество ветровых установок определяется, исходя из интенсивностей выделения вредностей работающей техникой, необходимого расхода воздуха до разбавления их до безопасных концентраций и технической производительностью самих воздушных установок [138].

Расчет интенсивности выделения вредностей в экскаваторном забое представлен в формуле (2.8) и (2.9):

по пыли

$$G_n = g_{эн} + g_{mn} n_m + g_{бн} \eta_b \quad (2.8)$$

по газу

$$G_z = g_{эз} + g_{mz} n_m + g_{бз} \eta_b \quad (2.9)$$

где  $g_{эн}$ ,  $g_{mn}$ ,  $g_{бн}$  - соответственно интенсивности выделения пыли экскаватором, транспортным средством (автосамосвалом), бульдозером,

$g_{эз}$ ,  $g_{mz}$ ,  $g_{бз}$  - то же для интенсивностей выделения газов (для электрических экскаваторов  $g_{эз} = 0$ ),

$n_m$  - количество транспортных средств, одновременно работающих в забое экскаватора,

$\eta_b$  - относительное время работы бульдозера,

Необходимый расход воздуха для разбавления вредностей в экскаваторном забое представлен в формуле (2.10) и (2.11):

по пыли

$$Q_n = G_n / (c_{ПДКн} - c_{фн}) / k_m \quad (2.10)$$

по газу

$$Q_z = G_z / (c_{ПДКz} - c_{фz}) / k_m \quad (2.11)$$

где  $G_n$  и  $G_z$  - интенсивность выделения вредностей в экскаваторном забое по пыли и газу,

$c_{ПДКн}$  и  $c_{фн}$  - предельно допустимая концентрация пыли и концентрация пыли в пылевом факеле,

$c_{ПДКz}$  и  $c_{фz}$  - предельно допустимая концентрация газа и концентрация газа в газовом факеле,

$k_m$  - коэффициент турбулентной диффузии.

Расход воздуха, подаваемый воздушными установками в экскаваторный забой, представлен в формуле (2.12):

$$Q_{вв} = 4,36 Q_0 (aZ / D_0 + 0,145) \quad (2.12)$$

где  $Q_0$  - расход воздуха в начальном сечении струи,

$a$  - коэффициент турбулентной структуры струи,

$D_0$  - диаметр вентилятора,

$Z$  - расстояние от вентилятора до проветриваемого участка.

Расчет количества участков в рабочей зоне, нуждающихся в искусственном проветривании, представлен в формуле (2.13):

$$n_y = k_{np} n_s \eta_s / 100 \quad (2.13)$$

где  $k_{np}$  - доля рабочей зоны, нуждающейся в искусственном проветривании,

$n_s$  - количество экскаваторов, работающих в карьере,

$\eta_s$  - коэффициент полезного использования экскаваторов.

Расчет количества воздушных установок, обеспечивающих разбавление вредностей, представлен в формуле (2.14):

$$n_{BY} = Q n_y k_{mz} / Q_{BY} \quad (2.14)$$

где  $Q = \max(Q_n, Q_e)$  - максимальный расход воздуха для разбавления вредностей в экскаваторном забое по пыли и газу,

$n_y$  - количества участков в рабочей зоне, нуждающиеся в искусственном проветривании,

$k_{mz}$  - коэффициент технической готовности ВУ,

$Q_{BY}$  - расход воздуха, подаваемый воздушными установками в экскаваторный забой.

В формулах (2.13) и (2.14) величины  $n_y$  и  $n_{BY}$  округляются до ближайшего целого значения.

Расчет объема зоны загрязнения для наиболее неблагоприятного направления ветрового потока со стороны экскаваторного забоя представлен в формуле (2.15):

$$\begin{aligned} V_s = & 1,5H^2(B + H \operatorname{ctg} \gamma) + \dots \\ & \dots + \frac{l_{\phi n}}{4} \left[ \left( l_{\phi n} \operatorname{tg} \alpha + \frac{L_m}{2} \right) (h_m + h_k + l_{\phi n} \operatorname{tg} \beta) + \frac{L_m}{2} (h_m + h_k) \right] + \dots \\ & \dots + \frac{\pi}{3} l_{\phi e}^3 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta n_m \end{aligned} \quad (2.15)$$

где  $H$  - высота уступа,

$B$  - ширина экскаваторной заходки,

$\gamma$  - угол откоса уступа,

$l_{\phi n}$  - длина пылевого факела, отсчитываемая от ковша экскаватора при разгрузке горной массы вдоль оси факела до точки, соответствующей предельно допустимой концентрации пыли в факеле,

$L_m$  и  $h_m$  - соответственно длина и ширина транспортного сосуда,

$h_k$  - расстояние от кузова транспортного сосуда до днища ковша экскаватора в момент разгрузки горной массы (высота разгрузки ковша),

$l_{\phi e}$  - дальность распространения вредностей от транспортного средства (длина газового факела),

$\alpha$  - угол раскрытия струи в горизонтальной плоскости,

$\beta$  - угол раскрытия струи в вертикальной плоскости.

В формуле (2.15) все линейные размеры измеряются в метрах.

Расчет времени накопления вредностей в проветриваемой зоне до значений ПДК представлен в формуле (2.16) и (2.17):

по пыли

$$t_n = V_3 (c_{ПДКп} - c_{фп}) / G_n \quad (2.16)$$

где

по газу

$$t_2 = V_3 (c_{ПДКг} - c_{фг}) / G_2 \quad (2.17)$$

где  $V_3$  - объем зоны загрязнения для наиболее неблагоприятного направления ветрового потока со стороны экскаваторного забоя,

$G_n$  и  $G_2$  - интенсивность выделения вредностей в экскаваторном забое по пыли и газу,

$c_{ПДКп}$  и  $c_{фп}$  - предельно допустимая концентрация пыли и концентрация пыли в пылевом факеле,

$c_{ПДКг}$  и  $c_{фг}$  - предельно допустимая концентрация газа и концентрация газа в газовом факеле.

## 2.2 Численный метод исследования воздушной среды в карьере

Одним из методов решения задачи аэродинамики при турбулентном движении воздушных потоков является применение системы уравнений термогидродинамики. В состав системы входит параметр Кориолиса, который для рассматриваемых масштабов пространственной области ( $\sim 50$  км) можно принимать постоянным ( $L = \text{const}$ ), в решении некоторых задач для малых областей ( $< 1$  км) и при слабых фоновых ветровых потоках действием силы Кориолиса можно вообще пренебрегать [159].

Правомочность этих предположений в принципе можно подтвердить оценками по фактическим данным. В случае, если задача касается искусственного воздействия на атмосферу карьера – при задании очень мощных высокотемпературных тепловых источников (метеотроны и другие термические установки), то в этом случае отклонения температуры от фоновой нельзя считать малыми, и сжимаемость воздушной среды начинает играть заметную роль, поэтому при решении таких задач рекомендуется использовать уравнение движения и неразрывности.

Следующим этапом является постановка начальных и краевых условий, которые во многом определяются особенностями конкретно поставленной задачи. Поскольку речь идет об



изучении реальных физических объектов, то параметры модели и начальных полей необходимо формировать на базе фактических измерений. В рамках задания граничных условий устанавливаются значения для исследуемых переменных, величина которых определяется размером зоны интегрирования и наличием требуемого объема фактических данных. Таким образом, в рамках рассматриваемой задачи для исследуемых переменных, следует устанавливать величину равную нулевому значению перед выполнением численных экспериментов. Также следует производить предварительное согласование моделируемых полей с фоновыми полями [160].

Альтернативным же вариантом задания начальных условий может быть расчет фоновых метеополей на большей территории ( $\sim 20$  км), окружающей карьер при использовании численной модели мезометеорологических процессов пограничного слоя атмосферы и далее применить сглаженные рассчитанные поля в качестве начального приближения для решения задачи микроклимата.

В качестве краевых условий на боковых границах области интегрирования показатели по рельефу, температуре и влажности следует задать таким образом, чтобы неоднородности их вблизи боковых границ исчезали, а горизонтальные размеры области должны быть выбраны из условия исчезновения на границах возмущений, создаваемых рельефом, влажностной и температурной неоднородностью. Температуру на подстилающей поверхности рекомендуется задавать явно, в виде некоторой функции, определяемой эмпирически. Необходимо также учитывать, что температура поверхности со временем претерпевает быстрые изменения и неоднородна по поверхности карьера, а получить необходимое поле температуры подстилающей поверхности из натуральных наблюдений очень трудоемко. Поэтому при отсутствии данных, следует определять краевые условия на поверхности для температуры из уравнения радиационного и теплового баланса на границе атмосфера-почва и уравнения теплопроводности почвы.

На верхней границе области возмущения всех метеоэлементов рекомендуется установить равным нулю. В некоторых вариантах целесообразнее задавать для составляющих вектора скорости на верхней границе условие сопряжения с фоновым потоком, а на боковых границах области - распределение скоростей и метеоэлементов по высоте, т.е. выход метеовеличин на фоновые значения [161].

Система уравнений, описывающая динамику атмосферных процессов в карьере, является не замкнутой, так как в операторах турбулентного обмена коэффициенты турбулентности зачастую не определены.

Первый вариант замыкания уравнений основан на подборе соответствующих эмпирических зависимостей для коэффициентов турбулентного обмена. В результате

полуэмпирическая модель является замыканием первого порядка и может дать достаточное соответствие для отдельных типов течений, но не имеют теоретического обоснования, так как опирается на феноменологические соотношения.

В качестве более простого способа используется второй вариант замыкания модели динамики атмосферы карьеров с применением полуэмпирических гипотез для коэффициентов турбулентного обмена.

Третий вариант замыкания уравнений позволяет более полно описать турбулентные характеристики атмосферы, особенно при задании искусственных источников, и допускающий сравнительно экономичную машинную реализацию. Этот подход заключается в представлении операторов турбулентного обмена непосредственно через тензор вязких напряжений Рейнольдса для уравнений движения осредненного потока [11].

### **2.2.1 Способы учета орографии в расчетных моделях**

Вследствие учета орографии карьера и окружающей местности геометрия области интегрирования значительно усложняется, что приводит к трудностям численной реализации уравнений модели в областях сложной формы. Имеются два способа учета горного рельефа и конфигурации карьера:

1) использование с приведенной высотой криволинейную систему координат, которая предоставляет возможность изменить начальную зону интегрирования в виде нестационарной формы на правильный прямоугольный параллелепипед. Идея метода заключается в том, что изменяется вид граничных условий на твердой поверхности. Новые переменные уравнения усложняются за счет появления новых членов, требующих дополнительных вычислений: коэффициентов, зависящих от функции рельефа и ее производных, а также членов, содержащих смешанные производные.

2) метод фиктивных областей применяется для численного решения задачи. Его основной принцип заключается в увеличении количества фиктивных областей с целью дополнения фактически полученной площади интегрирования, которая имеет сложную геометрию. Такой подход позволит предать исследуемой области наиболее удобную форму для выполнения численного интегрирования, а также укомплектовать системы уравнений специализированными условиями. Идея метода заключается в дополнении области решения сложной формы до области, удобной для численной реализации. Для исследования различных физических явлений в карьере с точки зрения аэрогазотермодинамики, требуется создание многофункциональной модели с определенной геометрией в зависимости от рельефа прилегающей к месторождению территории, для этого следует выполнить включение

фиктивных зон, что позволит без особого труда выполнить корректировку рельефа местности в случае необходимости [162].

Таким образом, применение обоих методов учета орографии позволяет решать задачи с произвольным рельефом карьера и окружающей местности и фактически сводится к составлению и численному решению систем уравнений, которые можно получить в результате преобразования исходной задачи, в более простых областях.

Преимущества и недостатки каждого из примененных методов учета орографической неоднородности подстилающей поверхности:

При решении данного типа задач в криволинейных координатах с приведенной высотой необходимо при составлении уравнений учитывать смешанные производные и производные от давления и функции рельефа; это затрудняет получение конечно-разностных аппроксимаций требуемого порядка точности и тем самым усложняет алгоритм решения задач. Другим недостатком при этом подходе является, вследствие преобразования области интегрирования в криволинейных координатах, разрежение конечно-разностной сетки и плохое разрешение дискретных аппроксимаций в области карьера, где ценность получаемой информации является максимальной. Преимущество решения системы уравнений в «выпрямленной» области заключается только в том, что в этом случае память ЭВМ используется активно [163].

Метод фиктивных областей направлен на мониторинг географических особенностей рельефа местности. Использование данного метода предоставляет возможность решения системы исследуемых уравнений без каких-либо изменений и модификаций. Такого рода упрощение алгоритма, а также сокращение времени, необходимое для получения решения, которое является неотъемлемым преимуществом метода по сравнению с первым способом. Это преимущество получается за счет упрощения обработки массивов и логических операций при использовании идеи метода фиктивных областей. С другой стороны, введение фиктивных областей потребует некоторых конструктивных усложнений и потери на использование памяти ЭВМ (на массивы и дополнительные логические операции). Потребность в памяти и использовании времени на дополнительные логические операции при применении метода фиктивных областей приводит к увеличению расхода памяти и уменьшению быстродействия за счет усложнения алгоритма при решении в криволинейных координатах с заданной точностью решения в интересующей нас области [12].

## **2.2.2 Основные принципы конечно-разностных уравнений, применяемые для расчета моделей**

Метод расщепления наилучшим образом подходит для выполнения дискретизации уравнений с определенным временным интервалом. При этом процедура расщепления исследуемых уравнений происходит, основываясь на физических процессах. Таким образом, изначальная задача, затруднительная с точки зрения выполнения численного подсчета, модернизируется в систему более простых задач, каждая из которых характеризует определенные точечные процессы моделируемой среды. Одним из преимуществ рассматриваемого метода является наличие возможности численной реализации стабильной и простой рабочей схемы. Все положительные стороны метод расщепления раскрывает при взаимодействии с вариационным принципом. Однако особенность применения проинтегрированного тождества включает в себя учет на всех этапах симметричных и антисимметричных составляющих пары элементов, это приведет к сходимости, которая заключается в обеспечении энергетически сбалансированного и устойчивого согласования на всех уровнях выполняемого решения. По этой причине, на каждом итерационном шаге следует рассматривать соответствующие этапы [164].

Получение конечно-разностных аппроксимаций для схем расщепления удобно строить непосредственно из интегрального тождества, используя для аппроксимации по времени дробные шаги. При этом не возникает проблемы в постановке краевых условий для отдельных этапов расщепления. Процесс аппроксимации выражения в зависимости от временного шага выполняется в следующей последовательности: Первое – выполнить дискретизацию соответствующего уравнения в виде интегрального тождества, после чего, основываясь на пространственных переменных, создается определенная система дифференциально-разностных уравнений и далее к этому набору уравнений применяют метод расщепления. В силу коммутативности операций расщепления по времени и дискретизации по пространству в зависимости от порядка выполнения этих операций можно применить и другие способы дискретизации модели.

Реализация первого этапа предъявляет дополнительные требования к методам решения и конечно-разностным аппроксимациям. В силу того, что концентрации примесей по физическому смыслу являются не отрицательными величинами, возникает дополнительное требование монотонности конечно-разностной схемы. Поэтому при решении этапа переноса примесей по траекториям наряду с энергетически-балансной схемой рекомендуется использовать явную монотонную схему [165].

Второй этап турбулентного переноса примесей решается по неявному алгоритму расщепления по пространственным координатам, которые используются для решения первого этапа расщепления в модели динамики атмосферы карьеров.

При решении третьего этапа, описывающего локальные преобразования примесей и влияние источников, используются модификации стандартных алгоритмов для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений и аппроксимирующих их алгебраических уравнений, но в численных расчетах ввиду отсутствия данных о скоростях газообразных реакций этот этап не рассматривается, а источники примесей задаются в краевых условиях или на предыдущих этапах расщепления.

После расщепления по пространственным координатам конечно-разностные уравнения решаются методом прогонки [13].

### 2.2.3 Модель радиационного баланса и теплового режима подстилающей поверхности

Одним из основных факторов, определяющих микроклиматические особенности в атмосфере карьера, является радиационный и тепловой баланс на поверхности земли. Влияние радиационных эффектов еще более усиливается различной ориентированностью, наклоном бортов карьера и возможностью искусственного управления тепловым режимом поверхности карьера. С целью определения величины температуры, которая может быть потенциально зафиксирована на поверхности, применяется уравнение сохранения тепловой энергии на перделе пересечения исследуемых сред (атмосфера-почва) (2.18):

$$\Phi_{\delta} - \rho c_p \left( v'_v \frac{\partial v}{\partial n} \right)_{\delta} - \rho L_{\omega} \left( v'_q \frac{\partial q}{\partial n} \right)_{\delta} = R + Y_v \quad (2.18)$$

где  $\Phi_{\delta}$  - поток тепла в почву,

$\rho$  - плотность воздуха,

$c_p$  - теплоемкость воздуха при постоянном давлении,

$v'_v, v'_q$  - коэффициенты турбулентного обмена тепла и влажности в приземном слое,

$L$  - скрытая теплота испарения или конденсации,

$v$  - количество тепловой энергии;

$q$  - влажность,

$R$  - радиационный баланс поверхности карьера,

$Y_v(x, y, t)$  - функция, описывающая антропогенные потоки тепла на поверхности карьера.

Для определения радиационного баланса горизонтальной подстилающей поверхности используется следующая формула (2.19):

$$R = I(1 - A) - F \quad (2.19)$$

где  $I$  - суммарная коротковолновая прямая и рассеянная радиация,

$A$  - альbedo подстилающей поверхности,

$F$  - эффективное длинноволновое излучение поверхности.

Для расчета коротковолновой радиации используется формула Албрехта, а эффективное излучение горизонтальной поверхности определяется по эмпирической формуле Брента.

Немало важным является так называемый склоновый эффект, который позволяет наиболее точно вычислить оптимальную величину бортов карьера и профиль подстилающей поверхности, имеющей неоднородную структуру, данная необходимость обуславливается зачастую различными углами откосов бортов уступов по отношению к окружающей территории, которые варьируются в диапазоне от 20 до 85 градусов. Ключевым элементом, в случай открытой разработки месторождения, является радиационный баланс, распространяющийся на склоновую часть карьера, который определяется из расчета особенностей расположения углов откоса борта уступа, а также объемов движения потоков, являющихся составной частью радиационного баланса, например, отражающийся поток между противоположно расположенными склонами или же между поверхностями различной направленности. Результат моделирования отраженного потока между двумя склонами продемонстрирован в работе ученого-исследователя Бакланова А.А. [14], откуда была установлена величина радиационного баланса, которая на несколько порядков отличается в меньшую сторону от иных составных элементов радиационного баланса. Поэтому, основываясь на корректности исходной информации и значительной трудоёмкости для вычисления, рекомендуется при выполнении практического расчета значением потока, являющегося элементом радиационного баланса, отраженного от одного склона к другому, пренебречь.

С целью вычисления радиационного баланса для поверхности уступов карьера и для окружающей Земной поверхности, прилегающей к месторождению, рекомендуется применять следующее уравнение (2.20):

$$R_{\delta} = (S_{\delta} + D_{\delta} + B_{\delta})(1 - A_{\delta}) - F_{\delta} - U_{\delta} \quad (2.20)$$

где  $S_{\delta}, D_{\delta}$  - потоки прямой и рассеянной радиации на наклонную поверхность,

$B_{\delta}$  - поток коротковолновой радиации, отраженной горизонтальной поверхностью перед склоном на поверхность склона,

$A_{\delta}$  - альbedo наклонной поверхности,

$F_{\delta}$  - эффективное длинноволновое излучение склона,

$U_{\delta}$  - длинноволновый обмен между поверхностью карьера и окружающей горизонтальной поверхностью.

С целью вычисления радиации, формирующейся солнечным излучением, на различные поверхности, ориентированные горизонтально или с некоторым углом наклона, рекомендуется применять следующее соотношение (2.21):

$$S_{\delta} = S_m \left[ \cos \alpha (\sin \varphi \sin \psi - \cos \varphi \cos \psi \cos \Omega) + \sin \alpha \left\{ \cos \psi_n (\sin \varphi \sin \psi \cos \Omega - \cos \varphi \sin \psi) + \sin \psi_n \cos \psi \sin \Omega \right\} \right] \quad (2.21)$$

где  $S_m$  - поток солнечной радиации на перпендикулярную к лучам поверхность при атмосферной массе  $m$ ,

$\alpha$  - угол наклона поверхности по отношению к горизонтальной плоскости,

$\varphi$  - широта местности,

$\psi$  - склонение Солнца,

$\Omega$  - часовой угол Солнца в данный момент,

$\psi_n$  - азимут проекции нормали к поверхности на горизонтальную плоскость.

Для определения времени излучения солнечной радиации на участки поверхности, отличные друг относительно друга ориентацией на местности и величиной площади распределения теней, возможно с помощью численного вычисления с заданием временного шага, только лишь после обнаружения линии, ограничивающей границу распространения тени на подстилающей поверхности.

Для получения корректного результата в процессе выполнения вычисления отраженного и рассеянного объема радиационного потока на плоскости с определенным углом отклонения относительно горизонтальной поверхности, а также величины эффективного облучения, требуется информация о текущих углах течения потоков, а именно отраженной, рассеянной радиации и эффективного облучения. Принимая во внимание условие, при котором отраженная и рассеянная радиация от поверхности, располагающаяся в горизонтальной плоскости, излученная тепловая энергия от атмосферы, а также горизонтальная поверхность изотропны, то в таком случае рекомендуется использовать следующие уравнения, с целью вычисления составных элементов радиационного баланса для склонов (2.22):

$$D_{\delta} = D \cos^2 \frac{\alpha}{2}, \quad B_{\delta} = B \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad F_{\delta} = F \cos^2 \frac{\alpha}{2} \quad (2.22)$$

где  $D, B$  - потоки рассеянной и отраженной радиации для горизонтальной поверхности,

$F$  - эффективное излучение горизонтальной поверхности,

$\alpha$  - угол наклона склона.

Длинноволновый обмен между склоном и горизонтальной поверхностью может быть рассчитан по формуле (2.23):

$$U_{\delta} = (l_{\delta}\sigma T_{\delta}^4 - l\sigma T_0^4)\sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (2.23)$$

где  $l_{\delta}$  и  $l$  - способность поверхности в виде склонов и прилегающей горизонтальной поверхности излучать,

$T_{\delta}$  и  $T_0$  - температура поверхностного склона и горизонтальной поверхности,

$\sigma$  - постоянная излучения,

$\alpha$  - угол наклона склона.

Теплопередача через поверхность почвы может быть выражена следующим образом (2.24):

$$\Phi_0 = c_s \rho_s \left( k_s \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\delta} \quad (2.24)$$

где  $c_s$  и  $\rho_s$  - удельная теплоемкость и плотность почвы,

$k_s$  - коэффициент теплопроводности почвы;

$T$  - температура почвы.

#### **2.2.4 Расчетная модель воздействия загрязняющих примесей на атмосферу карьеров в трехмерной постановке задачи**

Ключевым элементов эффективной разработки месторождения является атмосфера карьера, которая на постоянной основе подвержена воздействию загрязняющих и отравляющих веществ. Оценка текущих аэрологических условий с точки зрения загрязнения атмосферы карьера, позволяет повысить точность решения задач, направленных на повышение эффективности проветривания и нормализацию параметров карьерного воздуха. Что касается загрязняющих и отравляющих веществ, то они различаются как по химическому составу, так и по объему и источнику их образования. Их перемещения с воздухом в границах выработанного пространства во многом зависит от метеорологических условий, характеризующих район расположения месторождения, а также от применяемых способов искусственной интенсификации воздушного потока, с целью повышения эффективности вентиляции и сокращения времени необходимого для обеспечения параметров воздушной среды, соответствующих нормативным значениям ПДК. В том числе, к изложенному выше, можно добавить, что со стороны исследования, также представляет интерес изучение способов,



обеспечивающих химическую или физическую ликвидацию загрязнений в воздушной среде карьера. В связи с чем, описанную выше аэродинамическую модель карьера требуется оснастить специальной дополнительной математической моделью, учитывающей изменение и движение веществ в исследуемых границах [15].

Одной из отличительных особенностей распространения образующихся атмосферных выбросов, является то, что их состав может быть достаточно разнообразным. Вредные примеси могут содержать одновременно несколько единиц газовых и пылевых элементов. Это в первую очередь зависит от природы возникновения, к таким источникам можно отнести: ДВС горного оборудования, взрывные работы, горнорудная выемка и др. Однако, с точки зрения практического применения, загрязняющие и отравляющие вещества, проникая в воздушную среду атмосферы карьера, дополнительно осуществляют взаимодействие непосредственно между своими частицами в процессе движения, что приводит к химическому и в том числе фотохимическому изменению соединений.

В результате процесса преобразования химического состава, при построении аэродинамической модели карьера, загрязняющие вещества следует классифицировать как многокомпонентный объем.

### **2.2.5 Двумерные расчетные модели микроклимата и проветривания карьеров**

Реализация полной трехмерной модели при необходимом для практических целей разрешении требует большого объема оперативной памяти, быстрого действия вычислительного комплекса и возможна только на мощных ЭВМ с большими объемами оперативной памяти. Кроме того, для проведения расчетов на базе трехмерной модели требуется достаточно большой объем входной информации. На практике иногда возникают задачи частного характера, когда привлекать к решению все уравнения в трехмерной постановке нет необходимости [165].

Поэтому наряду с построением полной трехмерной модели гидрометеорологического режима карьеров имеется возможность построения двумерных численных моделей, использующих те или иные упрощения. Такого формата модели предназначены для проведения методических численных экспериментов и для практического решения задач естественной и искусственной вентиляции карьерных пространств в каких-либо более упрощенных постановках. Достоинствами этих моделей являются: во-первых, простота реализации, во-вторых, возможность решения на малых ЭВМ, так как они требуют меньшего объема машинной памяти и быстрого действия; в-третьих, для решения практических задач необходимо минимальное количество входной информации. Благодаря этим особенностям модели могут

успешно использоваться для оперативного прогноза и контроля загрязнения непосредственно на горнодобывающих предприятиях. Таким образом, сочетание полных трехмерных моделей с двумерными повышает эффективность численного моделирования и сокращает затраты на проведение исследований и решения практических задач [15].

### 2.2.6 Простейшая модель естественной аэрации карьерных пространств.

Для двумерного варианта задачи гидрометеорологического режима карьеров с учетом преобразований в виде исключения из рассматриваемого процесса влагопереноса и ряда допущений, входящих в приближение Буссинеска [23], получим систему в двумерном варианте в виде (2.25):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.25)$$

где  $u, v, \omega$  - компоненты вектора скорости потоков в направлениях осей  $x, z$ ,

$t$  - время,

$\mu$  - коэффициент турбулентности.

В качестве начальных задаются поля метеоэлементов по усредненным фактическим данным, а в случае их отсутствия принимаются значения равные нулю [166].

### 2.2.7 Двумерная модель микроклимата и загрязнения карьеров.

Модель является двумерным вариантом трехмерной модели за исключением того, что в качестве уравнения движения по  $Z$  применяется приближение квазистатики, и, кроме того, примеси полагаются пассивными. В прямоугольных координатах система уравнений записывается в следующем виде (2.26):

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \pi'}{\partial x} + l u' - \tilde{\Delta}_u u' + Y_u \quad (2.26)$$

где  $u, v, \omega$  - компоненты вектора скорости потоков в направлениях осей  $x, z$ ,

$t$  - время,

$\mu$  - коэффициент турбулентности,

$l$  - параметр Кориолиса,

$\tilde{\Delta}$  - объем элементарной сеточной ячейки,

$Y_u$  - составляющая вектора, определяющая искусственные источники импульса.

Начальные и краевые условия аналогичны предыдущей задаче. Основываясь на уравнении баланса тепловой энергии для границы двух сред (атмосфера-почва) вычисляется температура на подстилающей поверхности. Верхняя граница при этом задается на высоте  $H = \text{const}$ . Для описания рельефа используется метод фиктивных областей. Получение дискретных аналогов и численный алгоритм решения аналогичны численной реализации трехмерных моделей гидрометеорологического режима карьеров [20].

### 2.2.8 Модель процесса воздухообмена в карьерном пространстве с плавающей верхнеуровневой границей воздушной среды

В двух вышеописанных моделях при задании достаточно мощных вертикальных источников движения, для того чтобы исключить влияние верхней границы воздушной массы, приходится поднимать верхнюю границу интегрирования за счет увеличения шагов по вертикальной координате. Кроме того, при задании фоновых потоков на боковых границах, при различных уровнях поверхности на входе и выходе области необходимо нормировать потоки с учетом сохранения массы.

Поэтому для задач проветривания карьеров, когда вертикальные скорости достаточно велики, например, для задач теплового воздействия на атмосферные процессы в карьере, удобно задавать верхнюю границу области интегрирования незакрепленной. Таким образом, верхняя граница воздушной массы будет меняться в пространстве и во времени и определяться в процессе решения задачи [92].

Система уравнений после преобразования будет иметь следующий вид (2.27):

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + \lambda \delta_x \frac{\partial \pi'}{\partial x} v' + \tilde{\Delta}_u u' + Y_u \quad (2.27)$$

Начальные и краевые условия преобразуются в следующий вид (2.28 – 2.31):

$$\text{при } t=0 \quad v' = u' = 0, \quad H(x_0) = H_0(x) \quad (2.28)$$

$$\text{при } \sigma=0 \quad v = u = 0, \quad \omega = f(x, t) \quad (2.29)$$

$$\text{при } \sigma=1 \quad v' = u' = 0, \quad \omega = 0, \quad \eta = \lambda \Delta T \quad (2.30)$$

$$\text{при } x=0 \quad \frac{\partial u'}{\partial x} = \frac{\partial v'}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \omega'}{\partial x} = 0 \quad (2.31)$$

где  $u, v, \omega$  - компоненты вектора скорости потоков в направлениях осей  $x, z$ ,

$t$  - время,

$Y_u$  - составляющая вектора, определяющая искусственные источники импульса,

$\tilde{\Delta}$  - объем элементарной сеточной ячейки,

$\lambda$  - параметр конвекции,

$\delta$  - эмпирическая константа.

### 2.2.9 Двумерная модель искусственного проветривания карьеров.

При задании мощных искусственных источников движения для целей принудительной вентиляции карьеров значения вертикальной составляющей вектора скорости становятся сравнимыми с фоновыми горизонтальными движениями воздушных масс, а иногда и более большими значениями. В таких случаях приближение квазистатики, хорошо согласующееся с реальными движениями в пограничном слое атмосферы, дает недостаточное соответствие реальным физическим полям атмосферных движений. Кроме того, для глубоких карьеров с крутыми откосами бортов, особенно в условиях горного рельефа, при достаточно больших скоростях фонового ветрового потока начинают играть существенную роль подветренные волны, обусловленные орографической неоднородностью. Руководствуясь этими соображениями, при построении модели искусственного проветривания карьерных пространств рекомендуется использовать уравнения движения без приближения квазистатичности [168].

В этом случае атмосферные процессы в карьерах описываются следующей системой уравнений (2.32 – 2.36):

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \pi'}{\partial x} + lu' + \tilde{\Delta}_u u' + Y_u \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = -lu' + \tilde{\Delta}_u u \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \omega'}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial z} + \lambda \omega' + \tilde{\Delta} \omega + Y_\omega \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial \omega'}{\partial t} + u \frac{\partial \omega'}{\partial x} + \omega \frac{\partial \omega'}{\partial z} = -S\omega' + \tilde{\Delta}_\omega \omega' + Y_\omega \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \quad (2.36)$$

где  $u, v, \omega$  - компоненты вектора скорости потоков в направлениях осей  $x, z$ ,

$t$  - время,

$l$  - параметр Кориолиса,

$Y_u$  - составляющая вектора, определяющая искусственные источники импульса,

$\tilde{\Delta}$  - объем элементарной сеточной ячейки,

$S$  - параметр фоновой температурной стратификации.

Кроме того, как и в предыдущих моделях, здесь может учитываться перенос загрязняющих примесей и влажности в атмосфере карьера.

Набор краевых и начальных условий стандартный. При задании источников движения, особенно в конвективно-стратифицированной атмосфере, на верхней границе области интегрирования для вертикальной компоненты вектора скорости в качестве краевых целесообразнее задавать свободные условия [169].

Уравнения, представленные выше, решаются в декартовых прямоугольных координатах с применением метода фиктивных областей. Реализуются два варианта численного решения описанной системы уравнений. В первом варианте задача решается по алгоритму, представляющему двумерную версию численного решения трехмерной модели динамики атмосферы карьера. Во втором варианте решения задачи расщепление проводится только по пространственным координатам. Давление рассчитывается на каждом шаге по времени непосредственно из уравнения неразрывности при использовании идеи искусственной сжимаемости, предложенной Н.Н. Яненко [93].

### **2.3 Метод математического моделирования для исследования воздушной среды в карьере**

Методы изучения микроклиматических параметров воздушной среды, оценка текущего уровня загрязнения атмосферы в карьере и влияния искусственных источников на процесс обеспечения аэрологической безопасности сводится к применению математического моделирования, которое базируется на создании различных геометрических моделей и использовании разнообразных методов решения задач, основанных на уравнениях сохранения энергии, массы, скорости и др. Программные пакеты для математического моделирования зачастую применяются на высокопроизводительных электронно-вычислительных машинах [94]. Их использование обосновывается преимуществом, в виде получения высокоточных результатов, также они позволяют при помощи численных экспериментов получить результат для большой группы научно-исследовательских и практических задач, которые возникают вследствие проектирования и развития месторождения по добыче полезного ископаемого подземным или открытым способом, а также позволяют решить проблемы, возникающие с гидрометеорологическим, санитарно—экологическим обеспечением и с оценкой эффективности атмосфероохранных мероприятий на разрабатываемом месторождении. Необходимость использования методов математического моделирования также обуславливается сложностью выполнения натурных исследований на базе действующих

предприятий в реальном времени, а также ввиду ограниченности лабораторного метода исследования для моделирования аэрогазотермодинамических процессов внутрикарьерном пространстве [95].

Например, в работе Гридиной Е.Б. выполнено математическое моделирование аэродинамических процессов при проветривании Оленегорского карьера АО «Олкон» [Flow Vision]. Результат моделирования представлен на рисунке 2.4. Для задания граничных условий при формировании математической модели использовались данные натурных исследований, фактические геометрические характеристики карьерного пространства и метеорологические параметры (плотность, температура, давление воздуха) характерные для зимнего периода времени. В результате вычислений скоростных полей было установлено, что при увеличении глубины отработки месторождения происходит снижения скорости движения воздушных потоков. Вследствие этого, отчетливо наблюдается формирование рециркуляционных воздушных зон в общем контуре карьерного пространства [31].

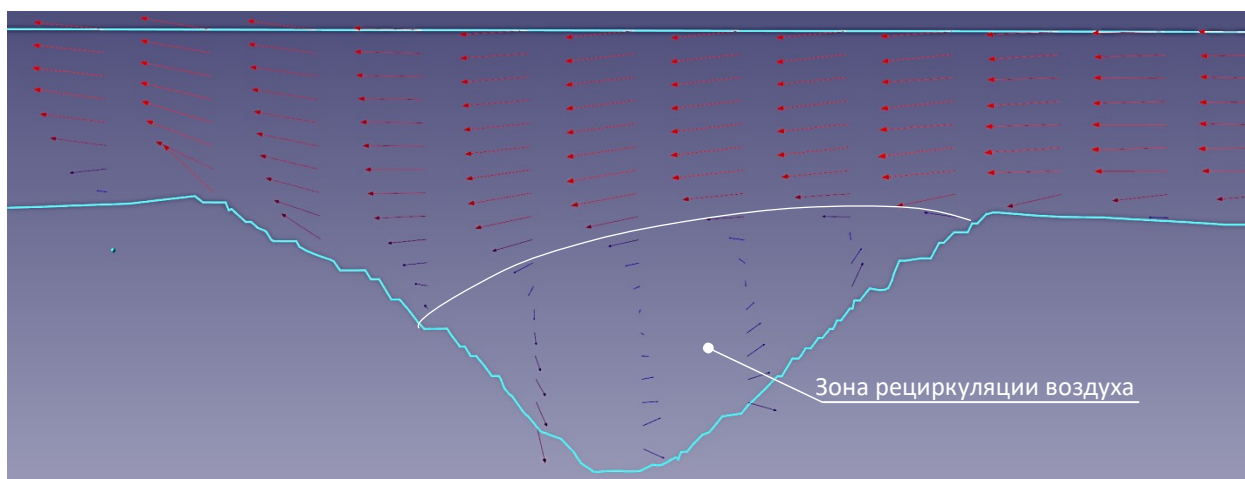


Рисунок 2.4 - Зона рециркуляционного движения воздушных масс в донной части карьера

Опыт применения программных пакетов также представлен в работе П.В. Амосова, С.А. Козырева, О.В. Назарчука, где для условий железорудного месторождения Ковдорского ГОКа разработана аэродинамическая модель карьерного пространства в программном комплексе Ansys Fluent с целью решения задачи по обеспечению соответствующих санитарных условий на рабочих местах для рабочих. Модель представлена на рисунке 2.5. В результате математического моделирования установлены условия образования температурных инверсий в зимний и летний период времени в зависимости от установившегося температурного поля в карьере, тем самым выполнена оценка формирующихся аэрологических условий в карьере [2,7].

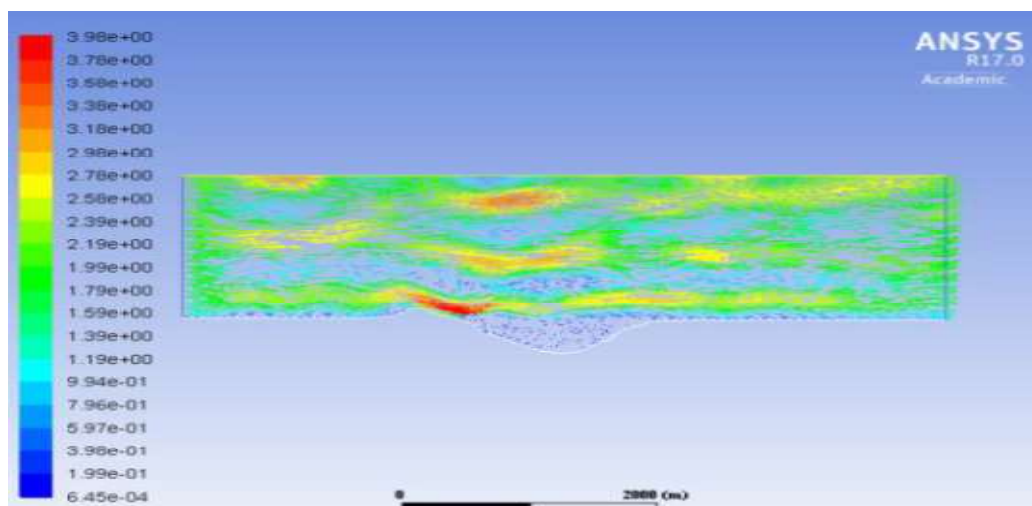


Рисунок 2.5 - Структура скоростного поля внутри аэродинамической модели карьерного пространства

Аналогичное исследование выполнено в работе С.А. Козырева и П.В. Амосова. Для математического моделирования использовался программный комплекс COMSOL. Моделирование осуществлено для условий карьера Центральный-Глубокий (Кольский полуостров), на основе которого создана геометрическая модель для анализа формирующегося поля скоростей при движении воздушных масс. На основе реализованной двухмерной модели, описывающей формирование скоростных полей, было установлено, что при воздействии отрицательных температур в донной части карьера скорость движения воздуха значительно замедляется и вероятность образования температурных инверсий возрастает, что в свою очередь способствует образованию зон рециркуляционного движения воздушных масс. Результат представлен на рисунке 2.6 [68,69].

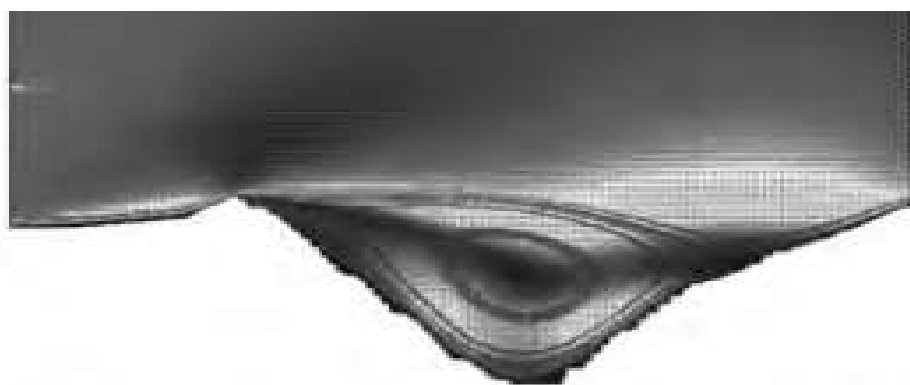


Рисунок 2.6 - Структура поля скорости по сечению Север-запад – Юг-восток при северо-западном потоке воздуха

Как было отмечено выше, с развитием месторождения увеличивается глубина выработанного пространства и эффективность действия естественного способа проветривания понижается, что приводит к образованию, так называемых, зон рециркуляционного движения воздуха, в которых накапливаются загрязняющие вещества, в связи с чем, необходимо

использование мероприятий, позволяющих интенсифицировать естественное проветривание [96].

Один из возможных горнотехнических методов интенсификации естественного проветривания карьерного пространства рассмотрен в работе Рогалева В.А. и Ястребовой К.Н. Ключевым элементом в интенсификации процесса естественного проветривания является аэродинамическое профилирование откосной части уступа, за счет регулирования угла откоса в зависимости от высоты участка. Формирующееся поле скоростей представлено на рисунке 2.7. В результате, образующийся профиль обеспечивает плавное и безотрывное обтекание воздушных масс, что в свою очередь позволяет исключить изменение направления движения потока воздуха внутри карьерного пространства [104].

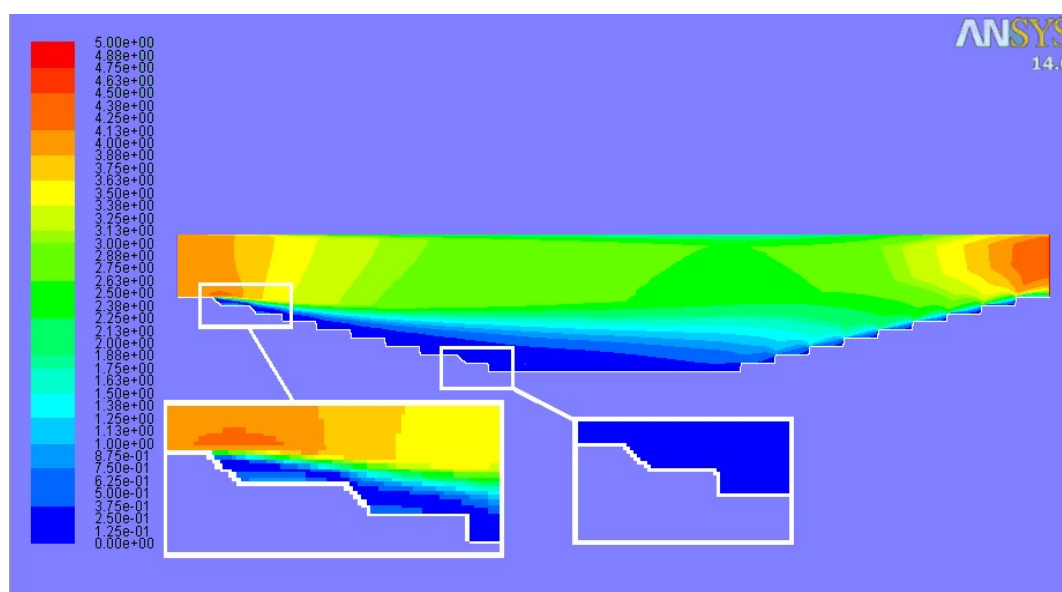


Рисунок 2.7 - Распределение скорости воздушного потока внутри границ карьерного пространства

## 2.4 Выводы по Главе 2

1. В процессе разработки месторождения границы карьерного пространства постоянно изменяются, возрастают производственные объемы, а вместе с ними и интенсивность работ в карьере. В результате формируются внутренние источники, от которых поступает объем вредных веществ в атмосферу и через определенный период времени концентрация начинает превышать предельно допустимые значения. Ситуация может усугубляться с изменением схемы движения воздушного потока, которая в свою очередь определяется отношением значения длинной оси карьера к его глубине, таким образом от начала развития до его окончания, схема движения плавно изменяется от прямоточной к рециркуляционной форме



движения, которая потенциально опасна с точки зрения накопления загрязняющих веществ и вредных примесей.

2. Двумерная математическая модель являются наиболее простыми и в тоже время эффективными инструментом для составления прогноза загрязнения атмосферы с течением времени, а также для моделирования процессов вентиляции карьера и дальнейшего анализа. Этот вывод следует из того, что для определенного класса задач эффекты трехмерности не играют решающей роли, и основные закономерности движения воздушных масс в карьере проявляются и в двумерных моделях. Но, с другой стороны, для некоторых метеоситуаций влияние эффектов трехмерности рельефа является решающим. Поэтому для наиболее полного описания метеорежима произвольных карьеров и решения задач искусственного проветривания необходимо решение трехмерной задачи.

3. На формирование атмосферы в карьерах оказывает влияние совместное действие нескольких факторов (температура среды, направление движения воздушных масс, скорость и др.). С увеличением глубины ведения добычных работ развиваются зоны обратного движения воздушных масс, которые потенциально опасны для накапливания вредных и загрязняющих примесей, ситуация может усугубляться в процессе образования температурных инверсий. Таким образом, для своевременной оценки аэрологической ситуации в карьере необходима постоянная работа в части прогнозирования формирующихся метеорологических условий в районе расположения месторождения. В связи с развитием программного обеспечения для решения задач аэрогазотермодинамики в последнее десятилетие наметилась тенденция широкого применения их для исследования особенностей формирования параметров карьерной атмосферы. Поэтому наиболее перспективным вариантом для прогнозирования является математическое моделирование на основе современного программного комплекса Ansys Fluent. Благодаря данному программному пакету возможно с высокой точностью осуществить оценку аэродинамических условий с учетом формирующейся температурной стратификации в атмосфере карьера. Это даст возможность на каждом этапе развития месторождения выявить условия формирования температурных инверсий или застойных воздушных зон при ведении горных работ на различных обрабатываемых горизонтах, что, в свою очередь, позволит своевременно разработать инженерно-технические мероприятия для решения образовавшейся проблемы.

## **ГЛАВА 3 НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

### **3.1 Анализ концентраций и химического состава воздушной среды на местах выполнения работ в карьере**

Рудничная атмосфера на постоянной основе подвергается воздействию загрязняющих веществ и вредных примесей, образующихся в процессе развития месторождения, которое сопровождается выполнением ряда технологических операций. При этом зачастую ей не уделяется должное внимание и с течением времени концентрация загрязняющих веществ на рабочем месте может начать превышать предельно допустимые концентрации, что в свою очередь окажет негативное влияние на здоровье горнорабочих и может привести к вынужденным простоям или вовсе остановке ведения горных работ в карьере на длительный срок. Поэтому организация аэрологической безопасности является актуальной задачей для большинства месторождений полезных ископаемых. В качестве объекта исследования отобрано золоторудное месторождение, расположенное в районе Крайнего Севера. Предметом исследования являются аэрогазотермодинамические процессы внутри границ карьерного пространства. На основе полученных данных натурного исследования, будет выполнен анализ и сделана оценка текущих аэрологических условий в карьере с прогнозом аэрологической обстановки на последующие периоды разработки месторождения.

Перед сбором информации и выполнением замером в условиях действующего месторождения района Крайнего Севера была построена блочная модель карьерного пространства при помощи программного комплекса Micromine. Это специализированная программа, предназначенная для трехмерного моделирования, подсчета запасов, также позволяет структурировать горно-геологические данные, проанализировать качественные показатели полезного ископаемого, тектонические нарушения вблизи залегания пластов и рудных тел. В данном случае модель использовалась для оценки текущего положения горных работ в карьере и на ее основе определены контрольные точки, в которых в дальнейшем был выполнен сбор данных по концентрации загрязняющих веществ и вредных примесей с целью дальнейшего анализа и оценки аэрологической ситуации.

Основываясь на текущем положении горных работ в карьере, представленным на рисунке 3.1, были определены контрольные точки, расположенные в срединной части карьера на западном борту с высотной отметкой в 770 метров и в донной части карьера в северном направлении с высотной отметкой в 720 метров относительно уровня Земной поверхности.

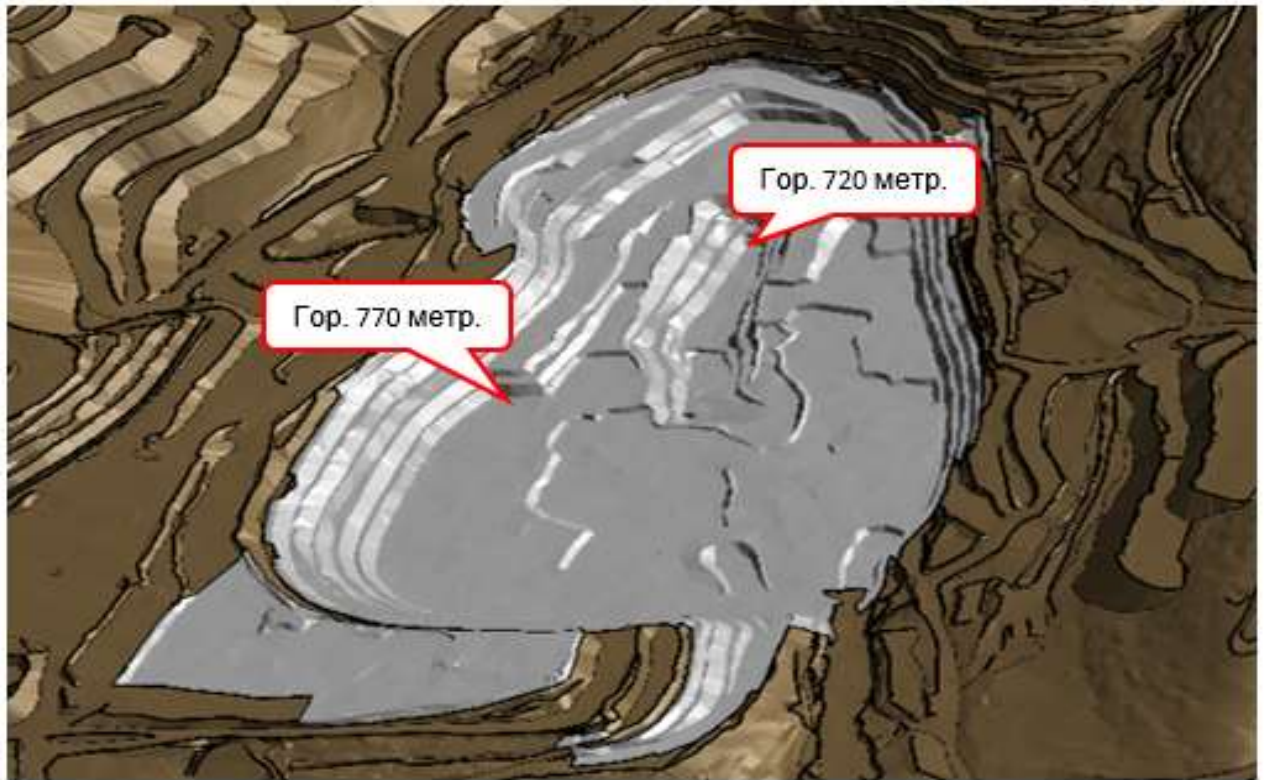


Рисунок 3.1 - Блочная модель исследуемого карьерного пространства

В отобранных контрольных точках были расположены действующие рудные забои, в которых на постоянной основе были задействованы горнотранспортные комплексы в составе гидравлического экскаватора марки Komatsu PC и крупногабаритных автосамосвалов марки Komatsu E. Замер производился при помощи специализированного инструментария, такого как мобильный Газоанализатор УГ-2, который обычно используется сотрудниками подразделения аварийно-спасательного формирования (АСФ). Периодичность измерения была определена 1 раз в сутки, преимущественно в дневное время и в первую половину дня в интервале с 7:00 до 14:00 часов, так как данный промежуток времени характеризуется минимальными технологическими простоями и максимальной часовой производительностью эксплуатируемого горнотранспортного оборудования. Данный вывод сделан из результатов анализа представленных на рисунке 3.2 и 3.3.

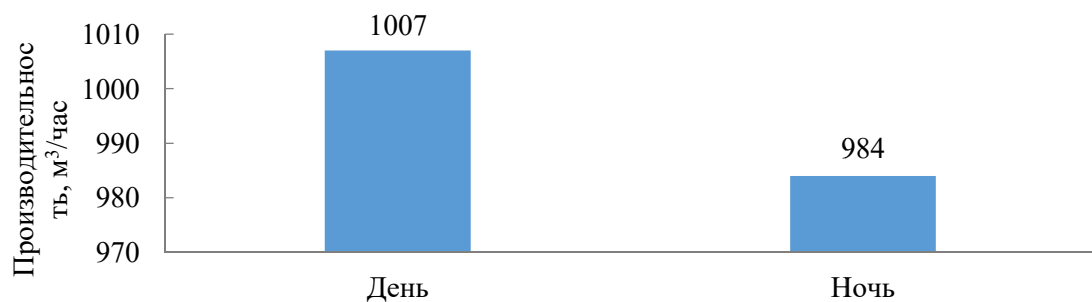


Рисунок 3.2 - Среднечасовая производительность экскаватора Komatsu PC в дневную и ночную смену

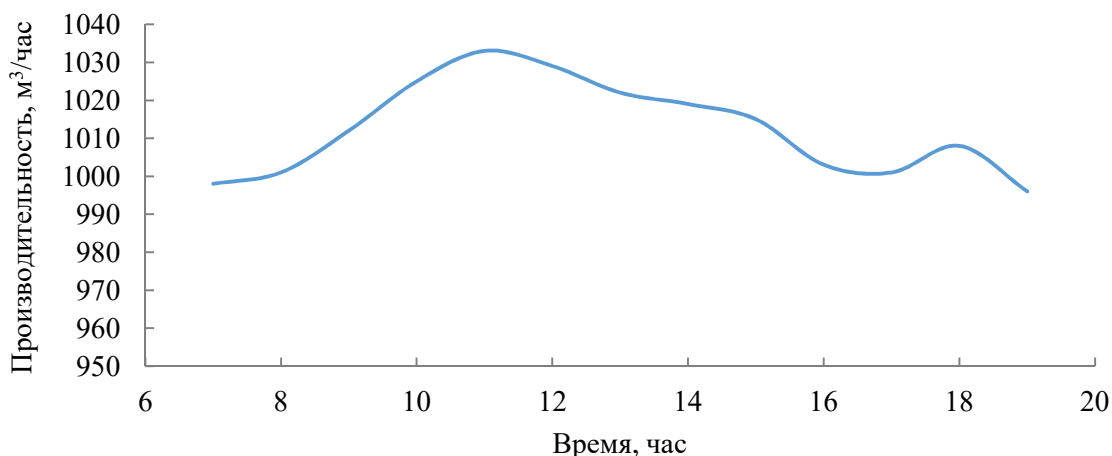


Рисунок 3.3 - Динамика изменения среднечасовой производительности экскаватора Komatsu PC в течение дневной смены

Согласно линейной зависимости, представленной на рисунке 3.3, с начала смены и до ее конца наблюдается падающий тренд часовой производительности гидравлического экскаватора Komatsu PC. Преимущественно данное снижение наблюдается во второй половине дня и в первую очередь связано с проведением ежедневных технологических операций, таких как заправка дизельным топливом, выполнение ежедневного технического обслуживания со стороны ремонтного персонала и другие операции. В результате эти факторы оказывают непосредственное влияние на коэффициент использования оборудования, что в свою очередь снижает часовую производительность выемочно-погрузочной единицы.

### 3.1.1 Физико-химический анализ рудничной атмосферы и анализ ретроспективных данных по загрязнению атмосферы в карьере

Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ при разработке месторождения происходят от многочисленного числа существующих источников. В результате в атмосферный воздух поступает объем загрязняющих веществ в виде неорганической пыли, сажи и отработанных газов двигателей внутреннего сгорания. В состав отработанных газов машин с дизельным приводом, которыми оснащены экскаваторы, погрузчик, бульдозер, автосамосвалы, входят: углерода оксид, азота диоксид, азота оксид, углеводороды (керосин), серы диоксид, сажа. Что касается пыли, то основными источниками пылеобразования являются выемочно-погрузочные и транспортные работы, а также ветровая эрозия открытых поверхностей карьера, склада щебня и отвала вскрышных пород.

В результате экспертной оценки валовые выбросы от объектов предприятия оценены с учетом коэффициентов, учитывающих специфику предприятия, и составляют 5 т/год. При этом непосредственно на самих рабочих местах концентрация вредных примесей с течением времени

может начать превышать предельно допустимые значения. Нормативные значения в зависимости от разновидностей загрязняющих атмосферу веществ, представлены в таблице 3.1, согласно Приказу Ростехнадзора от 08.12.2020 N 505 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых" [13].

Таблица 3.1 –Предельные концентрации загрязняющих веществ

Наименование ядовитых газов (паров)	Формула	Предельно допустимая концентрация газа на рабочих местах	
		% по объему	мг/м <sup>3</sup>
Оксид углерода (оксид углерода)	CO	0,0017	20
Оксиды азота (оксиды азота) в пересчете на NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	0,00026	5
Сернистый газ (диоксид серы, сернистый ангидрид)	SO <sub>2</sub>	0,00038	10
Сероводород	H <sub>2</sub> S	0,00071	10
Акролеин	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	0,000009	0,2
Формальдегид	CH <sub>2</sub> O	0,00004	0,5
Ртуть металлическая	Hg	-	0,01
Углеводороды алифатические (C <sub>1</sub> -C <sub>10</sub> ) предельные в пересчете на углерод	NH <sub>3</sub>	0,0025	20
	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	-	300

Из результатов анализа технической документации золоторудного месторождения района Крайнего Севера было установлено, что со стороны службы ОТ и ПБ осуществляется еженедельный мониторинг концентраций основных загрязняющих веществ непосредственно на рабочих местах в карьере. В результате анализа среднестатистических данных были выведены среднегодовые результаты по концентрации загрязняющих веществ, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Среднегодовые значения концентраций загрязняющих веществ в карьере

Год	Вещество			
	Углерода оксид	Азота диоксид	Азота оксид	Серы диоксид
	мг/м <sup>3</sup>	мг/м <sup>3</sup>	мг/м <sup>3</sup>	мг/м <sup>3</sup>
2013	0,3	0,1	0,1	0,3
2014	1,4	0,2	0,4	0,9
2015	3,1	0,3	0,7	1,5
2016	5,4	1,0	1,4	2,9
2017	9,2	1,9	1,8	3,8
2018	12,9	2,7	3,0	6,2
2019	17,0	3,5	4,4	9,1
2020	20,6	4,1	5,0	10,3

Следует отметить, что у службы ОТ и ПБ разработан определенный порядок действий, в случае получения значений концентрации загрязняющих веществ выше нормативных значений. Если разовый замер концентрации непосредственно на рабочем месте в карьере был получен с превышением предельно-допустимой концентрации на 3% и более, то все работы в данной области останавливаются на неопределенный срок, и производится дополнительный ряд замеров с частотой в 10-15 минут. Данная процедура осуществляется до тех пор, пока показатели атмосферы не нормализуются. В случае если разовый замер показал отклонение от нормы менее 3%, то работы продолжают в штатном режиме. В результате единственным методом борьбы с застойными зонами, применяемым на данном предприятии, является естественная вентиляция и средства защиты органов дыхания СГЭ-220.

На основании данных, представленных в таблице 3.2, была построена степенная зависимость концентрации вредных примесей от года разработки месторождения, представленная на рисунке 3.4.

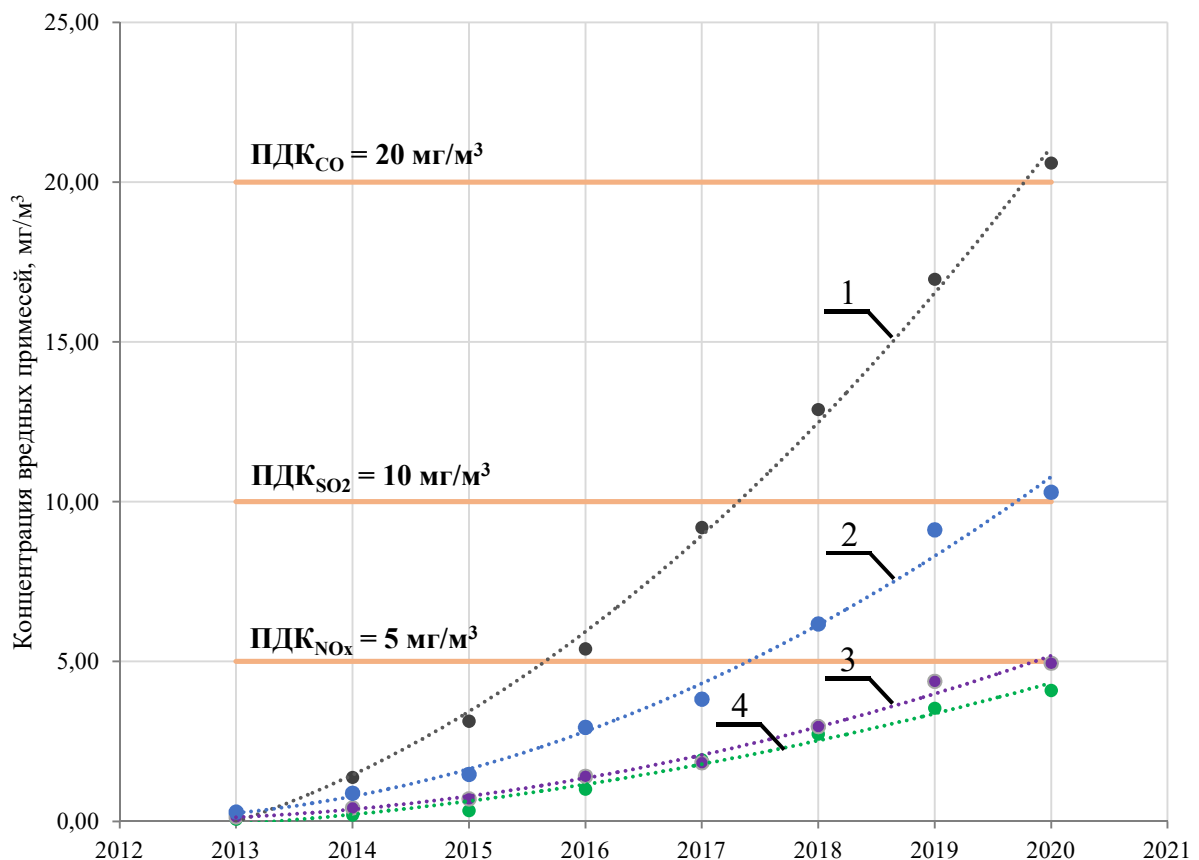


Рисунок 3.4 - Фактические величины концентраций контролируемых веществ на месторождении: 1) оксид углерода (CO); 2) диоксид серы (SO<sub>2</sub>); 3) оксид азота (NO); 4) диоксид азота (NO<sub>2</sub>);

Из нее следует, что с течением времени концентрация исследуемых веществ в среднем возрастает на 150-200% ежегодно. В первую очередь данная тенденция объясняется интенсивностью ведения добычных работ, а также постоянно увеличивающимися объемами добычи полезного ископаемого. Таким образом, на текущий момент можно утверждать, что концентрация CO и SO<sub>2</sub> превышает на 3% нормативные значения, представленные в таблице 3.1, что же касается NO<sub>x</sub>, то их значения находятся ниже нормативных в среднем на 10%.

### 3.1.2 Анализ результатов измерения концентраций загрязняющих веществ на рабочих местах

В течение одного месяца производились измерения концентраций загрязняющих веществ, таких как CO и NO<sub>2</sub>. Данным веществам на предприятии уделяется наибольшее внимание, поэтому совместно с сотрудниками АСФ производились измерения концентраций именно этих веществ. Результаты измерений представлены в таблице 3.3. Также в ней помимо зафиксированных фактических концентраций отражены превышения в процентном отношении к нормативным значениям, представленным в таблице 3.1. Из них следует, что для горизонтов, расположенных на 770 и 720 отметке, характерно 53% исследуемого времени с превышением концентрации загрязняющих веществ относительно ПДК в среднем на 9% и 17% соответственно. Из этого можно утверждать, что с увеличением глубины интенсивность воздухообмена снижается, и объем застойных зон увеличивается, в связи с чем, увеличивается величина концентраций вредных примесей.

В процессе выполнения натуральных измерений в случае возникновения аэрологических условий, при которых концентрация превышает ПДК более чем на 3%, то работы останавливались на интервал времени от 1 до 2 часов.

На основании табличных данных для визуализации полученных результатов построена графическая зависимость, представленная на рисунках 3.5 и 3.6.

Таблица 3.3 – Суточные значения концентраций загрязняющих веществ на рабочих местах

Дата	Горизонт 770 м				Горизонт 720 м			
	CO, мг/м <sup>3</sup>	Δ, %	NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Δ, %	CO, мг/м <sup>3</sup>	Δ, %	NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Δ, %
15.09.20	20,5	2,7%	3,16	-36,8%	27,69	38,5%	3,83	-23,4%
16.09.20	22,3	11,7%	5,24	4,8%	20,22	1,1%	4,77	-4,6%
17.09.20	17,3	-13,6%	5,4	8,0%	21,71	8,6%	3,74	-25,2%
18.09.20	19,2	-4,1%	5,89	17,8%	20,62	3,1%	5,59	11,8%
19.09.20	19,1	-4,5%	3,39	-32,2%	21,68	8,4%	4,46	-10,8%
20.09.20	18,9	-5,6%	5,46	9,2%	20,6	3,0%	3,59	-28,2%
21.09.20	21,8	9,1%	3,44	-31,2%	23,78	18,9%	3,8	-24,0%
22.09.20	20,1	0,5%	5,6	12,0%	22,69	13,5%	4,86	-2,8%
23.09.20	22,3	11,4%	5,31	6,2%	25,61	28,1%	5,81	16,2%
24.09.20	22,4	12,2%	4,21	-15,8%	18,46	-7,7%	4,57	-8,6%

Продолжение таблицы 3.3

Дата	Горизонт 770 м				Горизонт 720 м			
	CO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Δ, %	NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Δ, %	CO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Δ, %	NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Δ, %
25.09.20	21,4	7,1%	5,34	6,8%	18,11	-9,5%	4,67	-6,6%
26.09.20	21,2	5,7%	3,66	-26,8%	19,75	-1,3%	4,66	-6,8%
27.09.20	21,8	9,0%	5,79	15,8%	19,11	-4,5%	4,77	-4,6%
28.09.20	17,8	-10,8%	4,33	-13,4%	19,2	-4,0%	4,86	-2,8%
29.09.20	20,7	3,5%	3,88	-22,4%	20,15	0,7%	4,69	-6,2%
30.09.20	21,6	7,9%	3,55	-29,0%	20,51	2,6%	3,98	-20,4%
01.10.20	20,8	4,1%	4,3	-14,0%	26,1	30,5%	5,91	18,2%
02.10.20	17,3	-13,4%	5,19	3,8%	27,33	36,7%	4,51	-9,8%
03.10.20	21,7	8,5%	3,53	-29,4%	22,61	13,1%	5,63	12,6%
04.10.20	22,7	13,6%	4,7	-6,0%	25,84	29,2%	4,6	-8,0%
05.10.20	22,7	13,5%	4,84	-3,2%	19,1	-4,5%	4,93	-1,4%
06.10.20	20,3	1,4%	3,11	-37,8%	26,7	33,5%	4,45	-11,0%
07.10.20	19,3	-3,5%	4,11	-17,8%	23,82	19,1%	5,89	17,8%
08.10.20	19,4	-2,9%	4,47	-10,6%	26,43	32,2%	5,47	9,4%
09.10.20	19,3	-3,7%	5,38	7,6%	23,18	15,9%	5,95	19,0%
10.10.20	23,6	17,8%	4,1	-18,0%	25,21	26,1%	4,67	-6,6%
11.10.20	22,5	12,6%	3,87	-22,6%	25,58	27,9%	5,77	15,4%
12.10.20	20,3	1,5%	3,42	-31,6%	25,5	27,5%	4,66	-6,8%
13.10.20	20,3	1,4%	5,69	13,8%	18,32	-8,4%	5,85	17,0%
14.10.20	21,7	8,7%	3,2	-36,0%	19,93	-0,4%	4,62	-7,6%
15.10.20	23,8	18,8%	3,11	-37,8%	20,11	0,6%	4,69	-6,2%

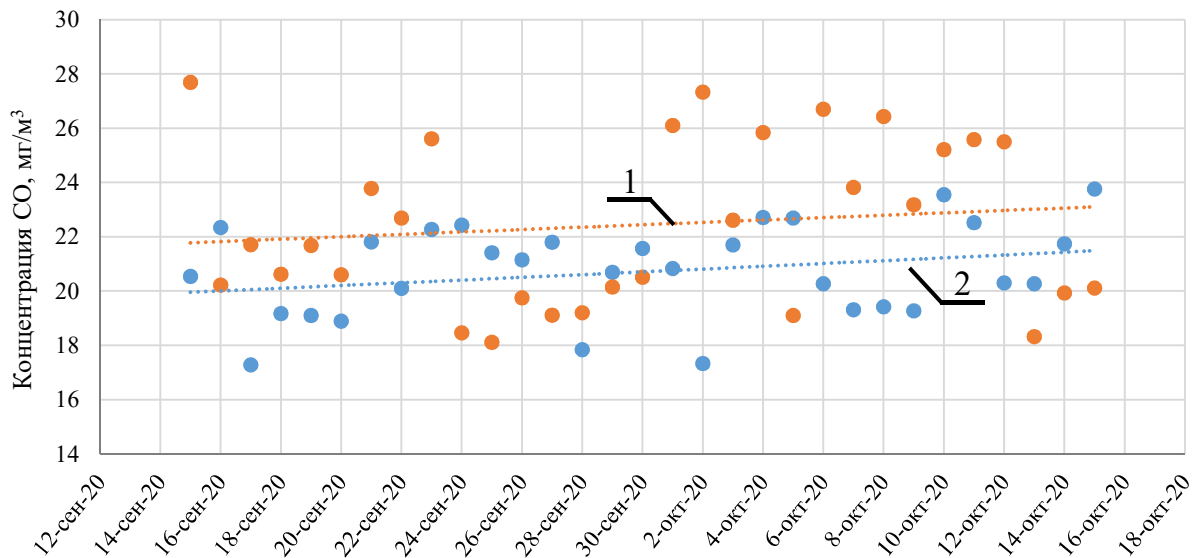


Рисунок 3.5 - Фактическая величина концентрации оксида углерода (CO) на рабочем месте горизонта с высотной отметкой: 1) 720 м; 2) 770 м;



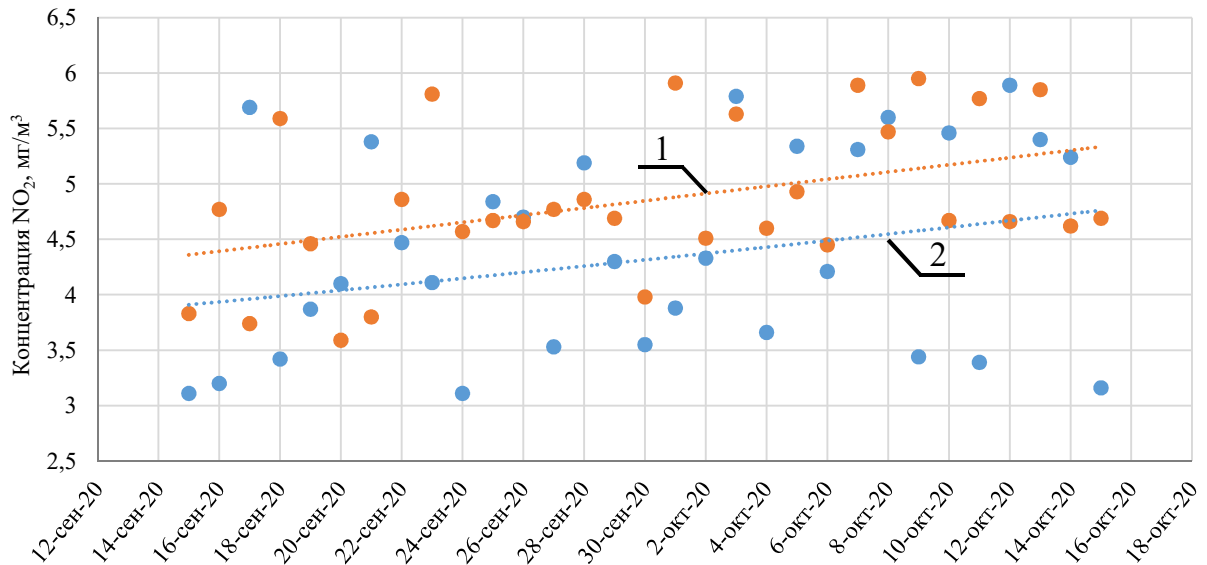


Рисунок 3.6 - Фактическая величина концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) на рабочем месте горизонта с высотной отметкой: 1) 720 м; 2) 770 м;

Из рисунка 3.5 и 3.6 следует, что среднее значение концентрации CO и NO<sub>2</sub> составляет 25,7 и 5,9 мг/м<sup>3</sup> соответственно. При этом концентрация CO в отличие от NO<sub>2</sub> превышает ПДК в среднем на 8%. Также на графиках наблюдается значительный разброс полученных значений относительно среднего, который варьируется в диапазоне от 17,3 до 27,6 мг/м<sup>3</sup> для CO и от 3,1 до 3,6 мг/м<sup>3</sup> для NO<sub>2</sub>. Это говорит о непостоянстве условий, в которых производились замеры. Зачастую низкие значения концентраций вредных примесей получались вследствие снижения интенсивности ведения работ в забое, что в свою очередь связано с периодическими выходами из строя горнотранспортного оборудования. В связи с чем, на линии было задействовано меньшее количество техники, чем обычно.

Если же рассматривать полученные результаты в общем, то наблюдается растущая тенденция, которая наиболее ярко представлена на рисунке 3.6, где концентрация NO<sub>2</sub> с начала проведения замеров возросла на 22%.

В результате сформировавшаяся аэрологическая обстановка в карьере приводит к увеличению количества незапланированных простоев горнотранспортных комплексов, это же в свою очередь ведет к экономическим потерям предприятия и повышению величины себестоимости готовой продукции. На эффективность работы производства оказывают влияние не только простои оборудования, но и вспомогательные операции, такие, например, как взрывные работы. Результатом взрывных работ является процесс формирования объема газообразных продуктов, которые взаимодействуют с атмосферой и, тем самым, загрязняют её. Следующим этапом является процесс нормализации параметров рудной атмосферы, время которого зависит от ряда факторов, таких как глубина разработки месторождения, конфигурация карьерного пространства, объема образующихся застойных зон и др. В

результате с увеличением времени проветривания возрастает время простоя горнотранспортного оборудования, что негативно сказывается на производственных показателях предприятия.

Глубина разработки месторождения с каждым годом возрастает совместно с плановыми объемами производства. Динамика отработки месторождения по глубине с течением времени представлена на рисунке 3.7. Из нее следует, что с каждым годом глубина ведения добычных работ увеличивается на 20% по отношению к предыдущим периодам. Как было отмечено выше, с глубиной увеличивается объем застойных зон в связи с чем, снижается интенсивность воздухообмена в карьере и увеличивается время на проветривание карьерного пространства после проведения взрывных работ. Динамика изменения среднего времени на проведение взрывных работ представлена на рисунке 3.8. Из нее следует, что за 2020 год глубина карьера увеличилась почти на 50 метров, при этом время на проведение взрывных работ в частности на проветривание карьерного пространства возросло более чем на 50%. Динамика изменения среднего времени на проветривание карьерного пространства представлена на рисунке 3.9.

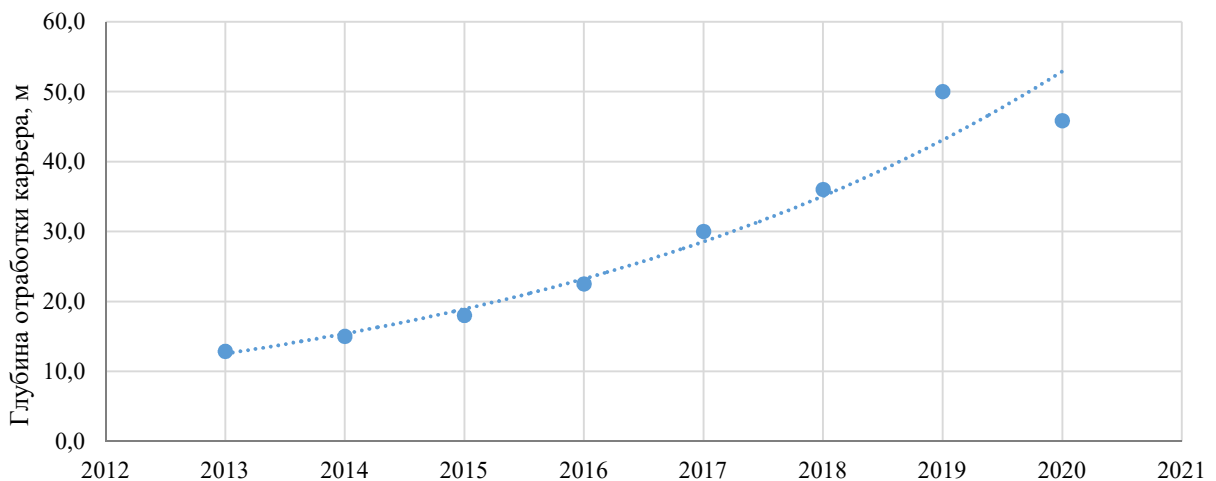


Рисунок 3.7 - Динамика отработки месторождения по глубине в зависимости от года разработки месторождения

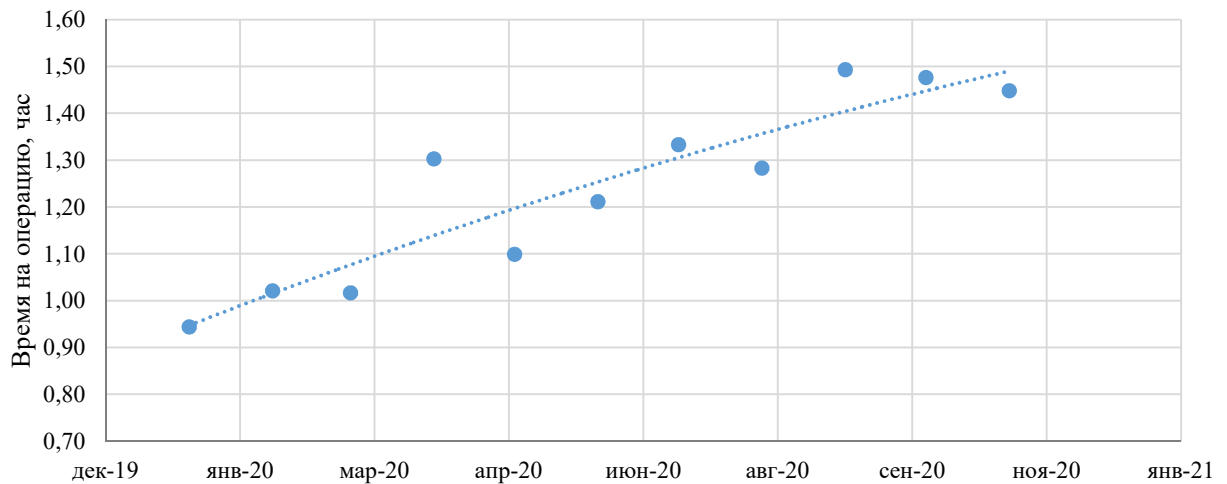


Рисунок 3.8 - Среднее время на проведение взрывных работ в карьере

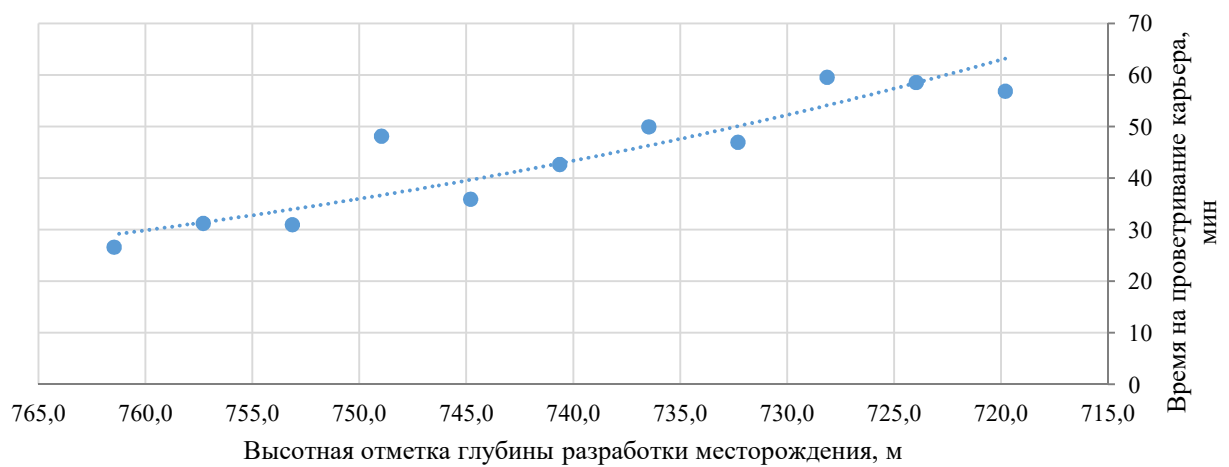


Рисунок 3.9 - Динамика изменения времени проветривания в зависимости от глубины разработки месторождения

### 3.1.3 Прогнозная оценка по результатам измерений концентрации

Согласно технической документации исследуемое золоторудное месторождение планируется разрабатывать до глубины в 650-700 метров. Тогда, конечная высотная отметка (донная часть карьер) составит 280 метров от уровня Земной поверхности. Таким образом, прогнозная динамика изменения глубины ведения добычных работ в карьере представлена на рисунке 3.10. Данная зависимость получена из результатов анализа фактически достигнутых глубин за определенный интервал времени. Из полученной зависимости можно сделать вывод, что ориентировочный год окончания разработки месторождения составит 2026, в отличие от проектного 2030. Данный результат получен из анализа фактического объема добычи полезного ископаемого в сравнении с утвержденной бюджетной программой, которая отличается в меньшую сторону на 2-3 порядка.

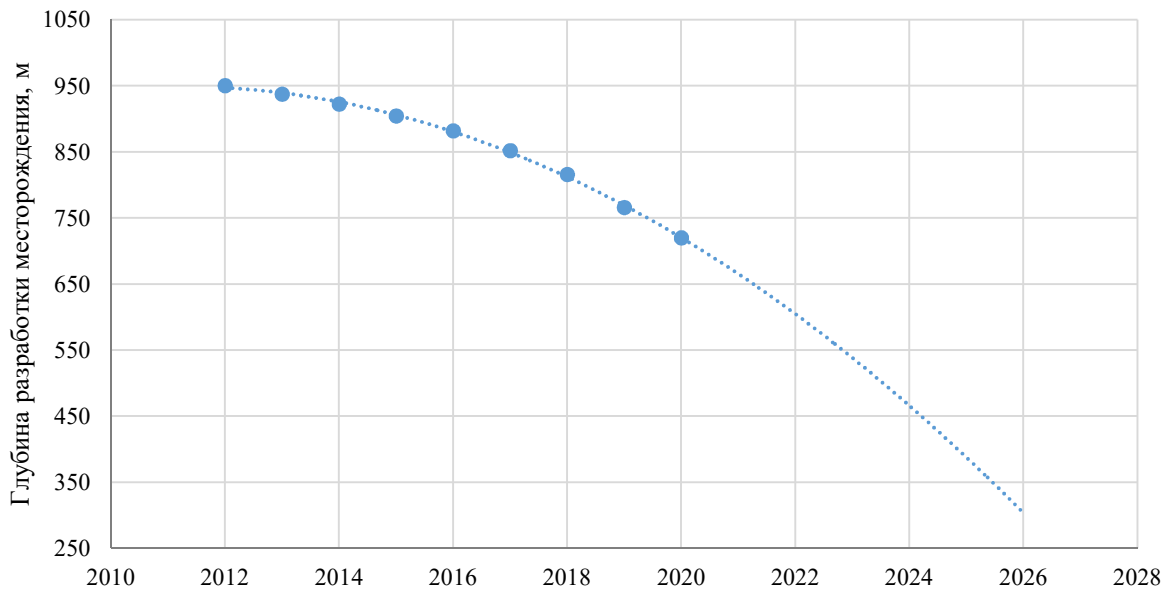


Рисунок 3.10 - Динамика изменения глубины разработки месторождения с прогнозом на конец разработки

Как было отмечено выше, с ростом глубины возрастает вероятность образования застойных зон и зон рециркуляционного движения воздушных масс, потенциально опасных для накопления загрязняющих и вредных примесей. Прогнозная динамика изменения концентраций загрязняющих веществ с глубиной представлена на рисунке 3.11. Из нее следует, что при сохранении текущего уровня развития месторождения без разработки и применения превентивных мероприятий, направленных на локализацию источников загрязнения и снижение значений концентрации до нормативных на постоянной основе, то уровень концентраций загрязняющих веществ на рабочих местах в карьере может возрасти на порядок и превысить ПДК в 2-3 раза. Так, например, к завершающему этапу разработки месторождения, уровень CO может достигнуть отметки в  $60 \text{ мг/м}^3$ , что является неприемлемым и крайне опасным для сотрудников предприятия задействованных в процессе ведения добычных работ. Аналогичная картина получена для остальных рассматриваемых вредных примесей, таких как  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$ .

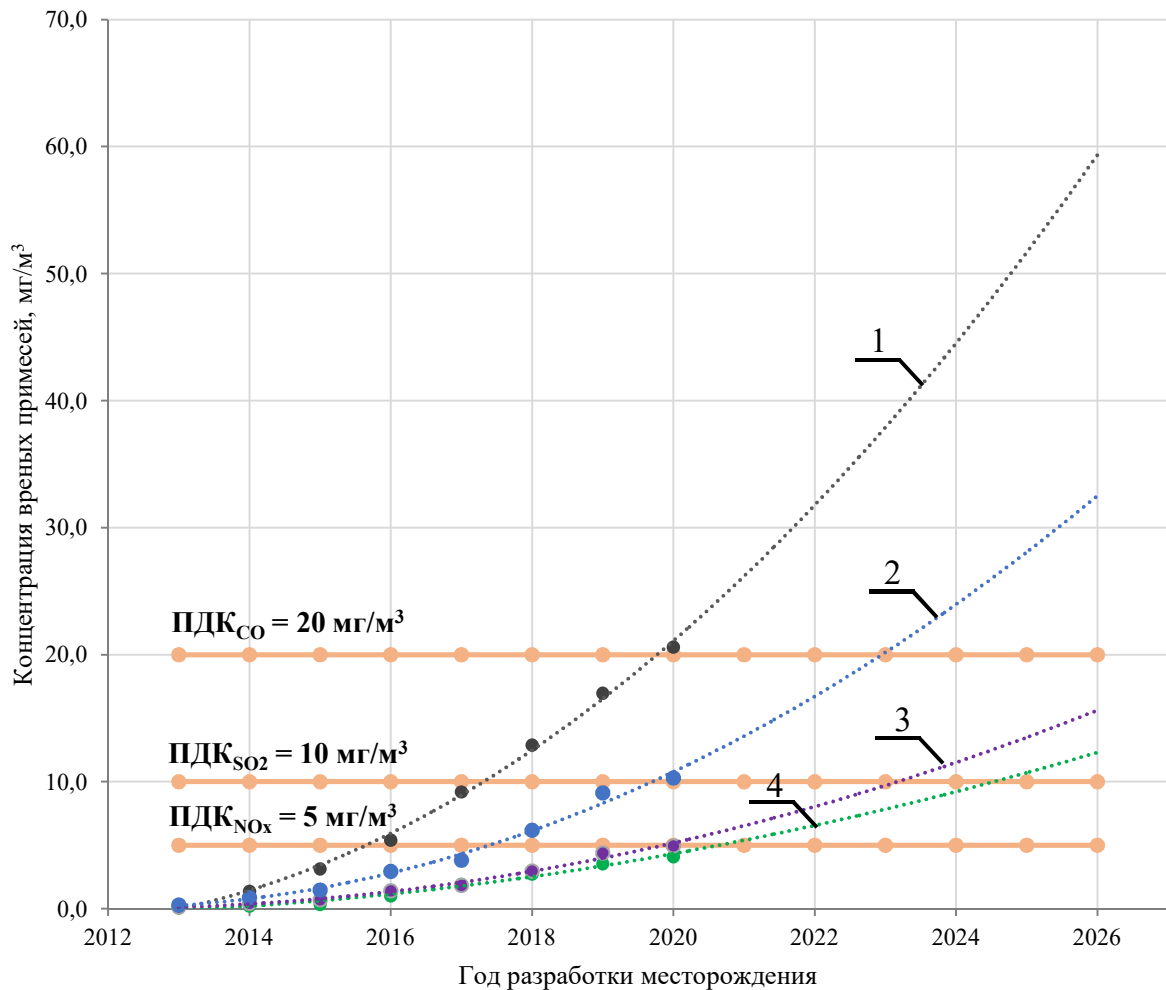


Рисунок 3.11 - Динамика изменения концентраций загрязняющих веществ с прогнозом на конец отработки месторождения: 1) оксид углерода (CO); 2) диоксид серы (SO<sub>2</sub>); 3) оксид азота (NO); 4) диоксид азота (NO<sub>2</sub>);

### 3.2 Анализ метеорологических параметров воздушной среды в карьерном пространстве

Одними из ключевых факторов, оказывающих влияние на формирование аэрологической обстановки в карьере, являются метеорологические условия, характеризующие район расположения месторождения. Метеорологические условия связаны с аномально низкими температурами воздуха в зимнее время, которые характерны для района Крайнего Севера. В среднем продолжительность таких условий достигает 9 месяцев. Также, не меньшее влияние оказывает направление движение ветрового потока и его скорость, которая изменяется на основе рельефа местности на прилегающей территории. Для дальнейшей оценки аэрологических условий в карьере, необходимо выполнить анализ метеорологических условий.

Измерение величины скорости движения и температуры производилось внутри границ карьерного пространства на рабочем горизонте с высотной отметкой 720 метров, что составляет

около 150 метров от уровня Земной поверхности. Перед выполнением измерений, условно, карьерное пространство было разделено на три основные зоны, а именно северную, западную и южную, каждой из них был присвоен свой порядковый номер от 1 до 3. Зонирование карьерного пространства представлено на рисунке 3.12. Измерения производились специализированным оборудованием преимущественно в дневную смену во второй половине дня с периодичностью в 2-3 дня на протяжении двух месяцев.

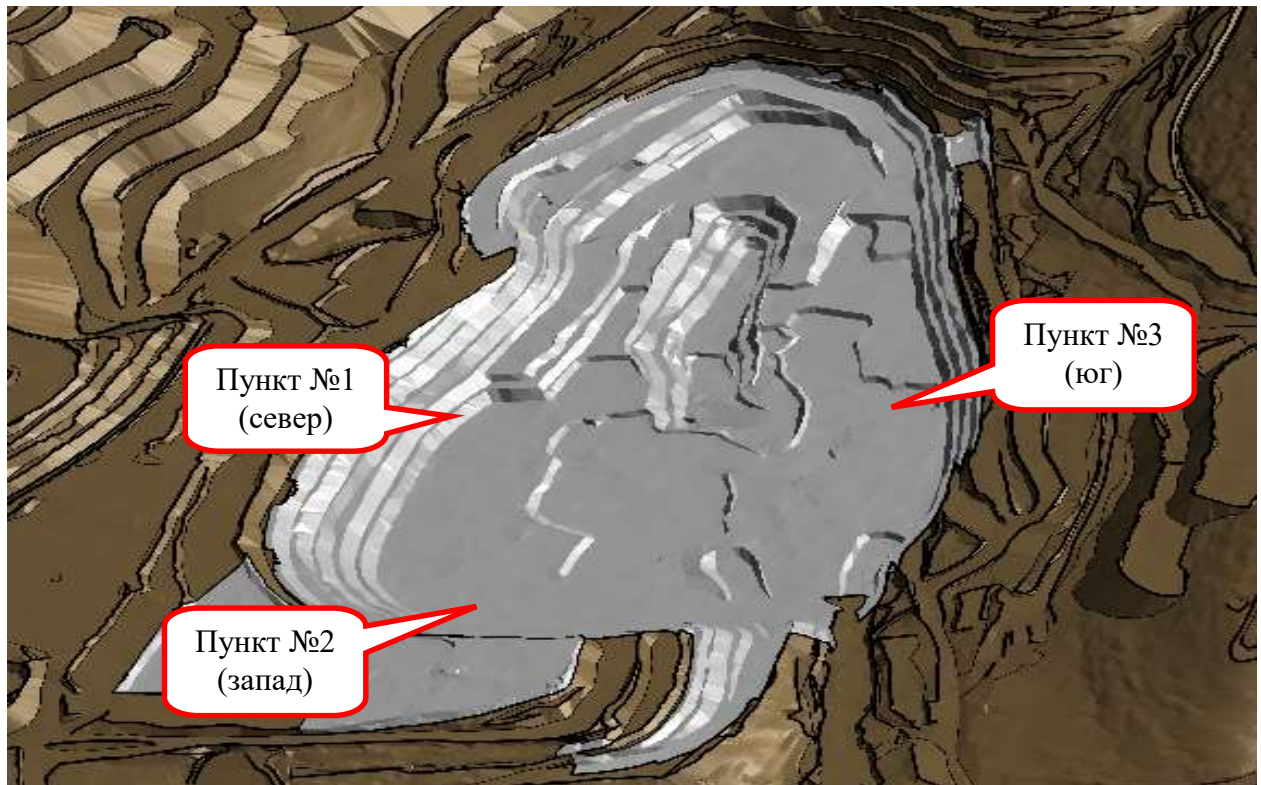


Рисунок 3.12 - Блочная модель исследуемого карьерного пространства

### 3.2.1 Анализ измерений скоростных и температурных характеристик воздушной среды в карьере

По результатам выполненных измерений получены температурные и скоростные характеристики воздушной среды в трех зонах карьерного пространства. Результаты измерений температуры представлены в таблице 3.4, а скорости в таблице 3.5. Из них следует, что внутрикарьерном пространстве преобладает температурная и скоростная неоднородность. Температура варьируется в диапазоне от 8 до 18 °С, а скорость от 0 до 10 м/с. В связи с чем, при различных метеорологических параметрах изменяются и аэрологические условия в карьере, оказывающие влияние на производственный цикл предприятия.

Таблица 3.4 - Результаты измерений температуры в контрольных точках карьера

Дата	Пункт 1, °С	Пункт 2, °С	Пункт 3, °С
13.08.2021	10,5	11,4	11,2
11.08.2021	15,0	15,0	15,3
09.08.2021	14,7	18,6	16,5
06.08.2021	14,0	15,0	16,3
02.08.2021	16,6	16,2	14,7
30.07.2021	16,8	16,1	14,0
26.07.2021	11,7	11,9	11,7
24.07.2021	13,4	14,6	14,3
21.07.2021	12,1	14,1	13,2
17.07.2021	13,7	13,2	12,5
14.07.2021	13,6	12,4	10,9
12.07.2021	10,0	11,0	11,6
08.07.2021	11,7	12,5	11,3
05.07.2021	12,2	13,2	12,2
01.07.2021	13,1	14,8	10,4
28.06.2021	16,2	15,0	17,9
22.06.2021	8,7	9,8	11,8
19.06.2021	14,0	13,4	12,8
15.06.2021	10,2	10,3	9,8

Таблица 3.5 - Результаты измерений скорости в контрольных точках карьера

Дата	Пункт 1, м/с	Пункт 2, м/с	Пункт 3, м/с
23.11.2021	2	1	3
21.11.2021	5	5	5
19.11.2021	3	4	5
18.11.2021	5	7	7
17.11.2021	6	5	4
14.11.2021	5	5	7
13.11.2021	3	2	2
11.11.2021	4	4	5
08.11.2021	4	4	3
07.11.2021	3	3	4
03.11.2021	1	2	1
30.10.2021	9	7	5
27.10.2021	2	3	3
25.10.2021	2	2	3
22.10.2021	1	1	2
18.10.2021	2	2	2
15.10.2021	2	4	1
13.10.2021	4	1	3
10.10.2021	1	2	3

Для обобщения полученных результатов для каждой из условно разделенных зон рассчитано среднестатистическое значение температуры и скорости движения воздушного

потока за исследуемый период времени. Распределение среднестатистических температур и скорости по зонам представлено на рисунке 3.13 и 3.14 соответственно.

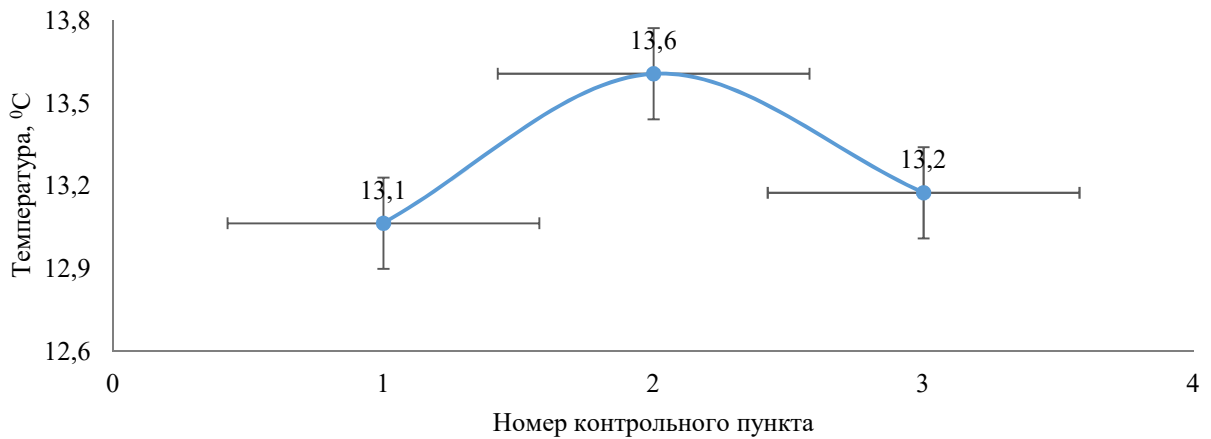


Рисунок 3.13 - Среднестатистическое значение температуры по условным зонам карьера

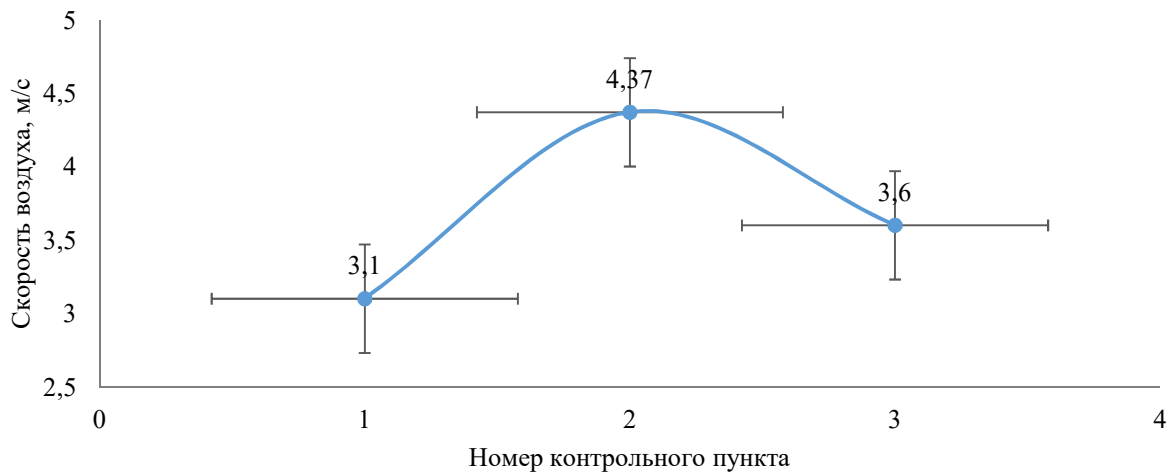


Рисунок 3.14 - Среднестатистическое значение скорости по условным зонам карьера

Из полученных результатов следует подтверждение гипотезы о неоднородности распределения температуры и скорости в карьере, так как в каждой исследуемой условно разделенной зоне устанавливается своя температура и скорость движения воздушного потока. При этом среднее значение отклонения температуры в исследуемых условных зонах за весь период измерений составило  $\pm 0,2$  °C, а скорости  $\pm 0,8$  м/с. Из числа основных причин возникновения данного явления может быть неравномерность распределения солнечной радиации по поверхности карьерного поля, а также, что не менее важно, непрерывная работа крупногабаритного оборудования (экскаваторов и автосамосвалов), которые оснащены двигателем внутреннего сгорания. В процессе работы такого оборудования вырабатывается большой объем тепловой энергии, таким образом, каждый горнотранспортный комплекс является своеобразным точечным источником тепла в карьере, который оказывает воздействие на формирование аэродинамических условий в карьере. Помимо тепла, источник такого типа



генерирует не малый объем загрязняющих веществ (неорганическая пыль, сажа), которые также взаимодействуют с окружающей средой в карьере.

Неоднородность температуры в карьере может привести к образованию температурных инверсий. Для их классификации внутрикарьерном пространстве, полученные результаты температурных измерений в карьере, были сопоставлены с температурой наружного воздуха. Сравнительный анализ представлен в таблице 3.6, из которой следует, что значения температуры наружного воздуха в среднем отличаются от температуры внутрикарьерной среды на  $+1,5^{\circ}\text{C}$ . Данный результат соответствует следующему температурному условию: воздушная среда в карьерном пространстве имеет более высокую температуру по сравнению с потоком воздуха движущегося за границами карьера. Тогда, схема движения воздушного потока, пересекающего карьерное пространство, должна выглядеть следующим образом: воздушный поток, движущийся по Земной поверхности, начинает пересекать карьерное пространство по нисходящей траектории и впоследствии должен концентрироваться в донной части карьера. В результате такое условие может привести к развитию застойных зон и зон обратного движения воздушных масс, которые потенциально опасны для накопления вредных и загрязняющих примесей.

Таблица 3.6 - Результаты измерений температуры в контрольных точках карьера

Дата	Наружный воздух, $^{\circ}\text{C}$	Воздух внутри карьера, $^{\circ}\text{C}$	Дельта, $^{\circ}\text{C}$
13.08.2021	9,7	11,0	1,3
11.08.2021	12,9	15,1	2,2
09.08.2021	13,9	16,6	2,7
06.08.2021	12,9	15,1	2,2
02.08.2021	12,8	15,8	3,1
30.07.2021	12,5	15,6	3,1
26.07.2021	11,5	11,8	0,3
24.07.2021	12,4	14,1	1,7
21.07.2021	11,4	13,1	1,8
17.07.2021	12,5	13,1	0,7
14.07.2021	11,5	12,3	0,8
12.07.2021	10,5	10,9	0,3
08.07.2021	11,2	11,8	0,7
05.07.2021	11,4	12,5	1,1
01.07.2021	11,6	12,8	1,1
28.06.2021	14,6	16,4	1,8
22.06.2021	9,4	10,1	0,7
19.06.2021	12,1	13,4	1,3
15.06.2021	8,2	10,1	1,9
		<b>Ср. знач.:</b>	<b>1,5</b>

Однако так как в карьере сформирована среда с более высокой температурой, то в результате взаимного теплообмена, температура поступившего воздуха повышается, его

плотность снижается, а скорость возрастает, таким образом, поток воздуха меняет траекторию движения и развиваются восходящие потоки, способствующие перемещению воздушных масс в карьере. В результате для текущего этапа разработки месторождения характерно образование температурной инверсии с положительным температурным градиентом.

Аналогичная работа была проведена со скоростью движения воздушного потока. Из результатов сравнительного анализа, представленного в таблице 3.7, следует, что значение скорости воздушного потока, движущегося по Земной поверхности, в среднем отличается от скорости внутрикарьерном пространстве на 3,5 м/с.

Таблица 3.7 - Результаты измерений скорости в контрольных точках карьера

Дата	Наружный воздух, м/с	Воздух внутри карьера, м/с	Дельта, м/с
23.11.2021	3	2	1
21.11.2021	6	5	1
19.11.2021	7	4	3
18.11.2021	5	6	1
17.11.2021	3	5	2
14.11.2021	5	6	1
13.11.2021	4	2	2
11.11.2021	6	4	2
08.11.2021	4	1	3
07.11.2021	3	4	1
03.11.2021	3	3	0
30.10.2021	7	1	6
27.10.2021	2	7	5
25.10.2021	2	3	1
22.10.2021	3	2	1
18.10.2021	4	1	3
15.10.2021	5	2	3
13.10.2021	4	2	2
10.10.2021	1	3	2
		Ср. знач.:	3,5

### 3.3 Выводы по Главе 3

1. На текущий момент на рабочих местах в карьере, разрабатываемом в районе Крайнего Севера, не обеспечивается полноценная аэрологическая безопасность. В результате чего, формирующееся аэрологическое условие не позволяет месторождению работать по методу непрерывного производства, так как более 50% рассмотренного времени концентрация вредных примесей в среднем превышает предельно допустимое значение на 13%. Это в свою очередь влечет за собой минимальную остановку всего парка техники на 1-2 часа до момента нормализации параметров рудничной атмосферы в карьере. При этом рассматривая полученные результаты в общем, то можно утверждать, что для каждого рассмотренного вещества

характерна растущая тенденция, так, например, величина  $\text{NO}_2$  с начала проведения замеров возросла на 22%. Также следует отметить, что формирование аэрологической ситуации в карьере непосредственно зависит от постоянно возрастающих объемов добычи полезного ископаемого, которые приводят к повышению интенсивности производства и как следствие, к росту объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Следующим, немало важным фактором, является конфигурация карьера, которая постоянно изменяется в процессе ведения добычных работ. В результате с увеличением глубины разработки месторождения интенсивность воздухообмена начинает снижаться, тем самым эффективность вентиляции карьера, формирующейся естественными потоками воздуха, уменьшается.

2. Согласно прогнозной оценке на золоторудном месторождении с увеличением глубины ведения добычных работ возрастает риск превышения предельно допустимого значения по концентрации загрязняющих веществ в несколько раз. В связи с чем, для обеспечения аэрологической безопасности необходима разработка корректирующих мероприятий, направленных на повышение интенсификации естественной вентиляции. Также возможным вариантом решения проблемы может быть применение методов искусственной вентиляции в виде мобильных реактивных двигателей. Или же можно оснастить рабочий персонал системами противогазо-аэрозольной защитой, которые устанавливаются в кабины горнотранспортного и бурового оборудования и за счет специализированных фильтров в данном приспособлении в операторском помещении обеспечиваются нормативные показатели воздушной среды. Все эти решения являются локальными и не решают более масштабной проблемы производства.

3. На формирование аэродинамических процессов в карьерном пространстве оказывают влияние метеорологические условия района расположения месторождения, при этом в каждой его части устанавливается свой температурный и скоростной режим. Так, например, при условном разделении на западную, центральную и восточную зону среднестатистические показатели отклонения по скорости составили  $\pm 0,8$  м/с, а по температуре  $\pm 0,2$  °С. В результате данные условия могут привести к образованию температурных инверсий и застойных зон, потенциально опасных для накопления загрязняющих и вредных примесей.

4. Возможность применения естественной вентиляции карьеров, расположенных в Арктической зоне России, для нормализации параметров рудничной атмосферы после проведения ряда технологических операций, следует определять с учётом стохастических законов изменения термодинамических параметров атмосферного воздуха, определяющих величину температурного градиента в воздушном пространстве.

## **ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КАРЬЕРОВ**

### **4.1 Методология разработки аэродинамической модели карьерного пространства золоторудного месторождения**

Для решения аэродинамических задачи со стороны современных ученых-исследователей наиболее перспективным вариантом считается использование математического моделирования на основе различных программных комплексов, таких как Ansys Fluent [1]. Благодаря программному пакету возможно с высокой точностью осуществить оценку аэродинамических условий с учетом влияния различных характеристик воздушной среды в карьерном пространстве. Это позволяет на каждом этапе развития месторождения выявить условия формирования температурных инверсий или рециркуляционных воздушных зон в процессе ведение горных работ на различных обрабатываемых горизонтах, это, в свою очередь, позволит своевременно разработать инженерно-технические мероприятия для нормализации параметров рудничной атмосферы [5].

Для построения аэродинамической модели карьера и оценки аэрологических условий на месторождении необходимо выполнить следующие этапы [147,149]:

Первый этап – основываясь на проектной документации предприятия, выполнено построение виртуального геометрического образа карьерного пространства при помощи программного модуля SpaceClaim. При построении модели карьера учитывались геометрические особенности, такие как основные глобальные параметры (длина, ширина, глубина), проектные направления проходки горизонтов и углы транспортных съездов [6]. Рельефные элементы на прилегающей к карьере территории были упрощены, так как с течением времени увеличивается количество дорог, трубопроводов и электросетей, имеющих как промышленное, так и общее назначение, и их прогноз на данный момент времени затруднителен. На рисунке 4.1 изображена аэротермодинамическая модель карьера золоторудного месторождения.

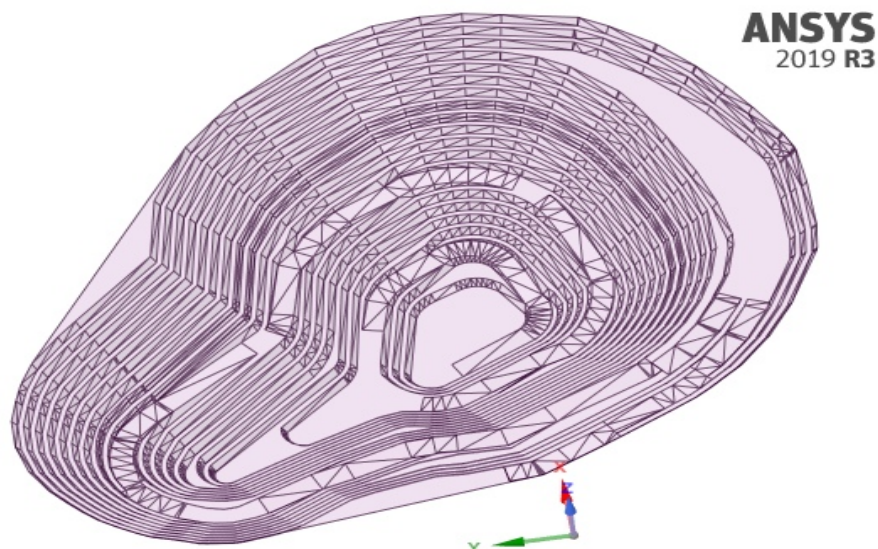


Рисунок 4.1 - Геометрия моделируемой области.

Второй этап – создание в области геометрической модели расчётной сетки. На поверхности моделируемого объекта создается сетка. Она генерируется на основе метода конечных объемов [53]. При использовании функциональных возможностей Ansys для построения сеточного объекта используется метод CutCell, который позволяет генерировать гибридную сетку, где в основной моделируемой области преобладают гексаэдры, а вблизи границ создаются ячейки на основе тетраэдров [54]. Результат сгенерированной сетки представлен на рисунке 4.2. Общая емкость сеточного объекта составила 841231 элементов. Метод CutCell хорошо подходит для построения объемной сетки на объектах, имеющих внутренние области, и широко применяется в задачах аэродинамики. Имеет также ряд преимуществ по сравнению с другими методами:

- При создании геометрии исходная геометрия может иметь не высокое качество;
- Осуществляет обработку перекрывающихся областей геометрии в автоматическом режиме;
- Сеточный объект при построении содержит высокий процент гекса- элементов, что позволяет снизить численную диссипацию;
- При одинаковом сеточном разрешении создает меньшее количество элементов по сравнению с другими методами;
- Грани или перегородки, имеющие нулевую толщину, исправляются автоматически;

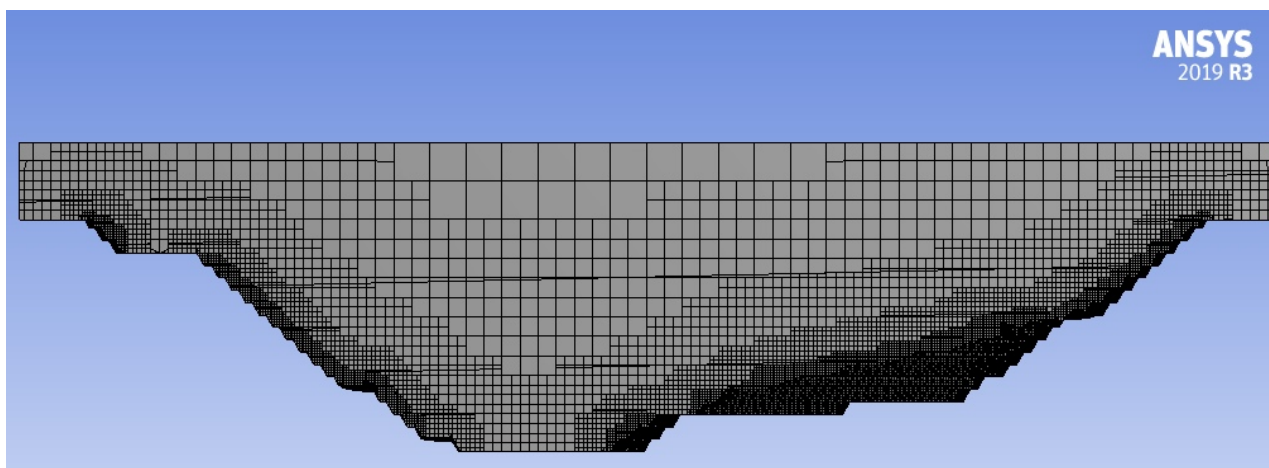


Рисунок 4.2 - Сформированный сеточный объект при использовании метода CutCell.

Третий этап – определение и задание граничных условий, а также значений искомых параметров течения на границах расчетной области. Выбор размера и границ расчетной области, через которые среда «втекает» и «вытекает», а также имеется граница типа «стенка» или «симметрия». После постановки граничных условий необходимо выбрать метод приближенного решения задачи и присвоить начальные значения всем искомым переменным (температура, давление, плотность, скорость, направление воздуха и др.) во всех ячейках расчетной области [57].

Четвертый этап – математическое моделирование процесса взаимодействия двух воздушных потоков с разными теплофизическими свойствами в объеме созданной геометрической модели карьерного пространства при помощи программного комплекса Ansys Fluent [58]. В процессе моделирования трехмерной задачи используется метод «смеси» основанные на Эйлерово-Эйлеровом подходе, который заключается моделировании несущей фазы путем отслеживания траекторий частиц по всей расчетной области. Траектории дисперсной фазы вычисляются на заданном временном интервале после расчета поля течения несущей фазы. Дисперсная фаза может обмениваться импульсом, массой и энергией с несущей фазой, для чего в уравнения включены соответствующие обменные члены [59]. Фазы рассматриваются как взаимопроникающие континуумы, т.е. в каждой точке среды могут присутствовать различные фазы. Объемные концентрации фаз предполагаются непрерывными функциями от времени и пространственных переменных. Для каждой фазы выписываются дифференциальные уравнения. Для замыкания этих уравнений используются дополнительные соотношения, которые получены эмпирически или из кинетической теории [60].

Для вывода данных по изменяющимся параметрам воздушной среды с целью дальнейшего исследования, необходимо запустить решатель Ansys Fluent, основанный на методе конечных объемов, в котором расчетная область разбивается на множество локальных элементов (расчетных ячеек) [100]. Для каждого локального элемента записывается система

законов сохранения массы, импульса и энергии в интегральной форме, которая затем преобразуется к системе алгебраических уравнений относительно искомых величин – плотности, скорости, температуры и др. В общем виде законы сохранения записывается следующим образом (4.1):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi U dA = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \Phi dA + \int_V S_\phi dV \quad (4.1)$$

где  $\rho$  - плотность,

$V$  - объем ячейки,

$U$  - скорость,

$A$  - ее поверхность,

$\Phi = U_i$  - для закона сохранения момента импульса в  $i$ -м направлении,

$\phi = 1$  - для закона сохранения массы,

$\phi = h$  (энтальпия) для закона сохранения энергии.

В результате, в левой части уравнения стоят члены, описывающие нестационарный и конвективный перенос, а в правой – диффузию, источники или массовые силы [126]. Также при расчете воздушных течений учитывается закон сохранения энергии и массы. Модель движения воздушных потоков принята стандартная ( $k$ - $\epsilon$ ) модель турбулентности, которая предназначена для начальных и параметрических исследований, поэтому в расчетную модель включено уравнение для турбулентных параметров. Интегрируемыми переменными в задаче выступают компоненты скорости, давления и температуры [127]. Таким образом, учет изменения плотностной характеристики воздуха в зависимости от температуры осуществляется посредством следующего соотношения (4.2):

$$\rho = \rho_i \left(1 - \frac{T - T_i}{T_i}\right) \quad (4.2)$$

где  $\rho$  - плотность,

$T$  - температура.

Параметры с символом  $i$ -ое соответствуют значению плотности и температуре поступающего воздуха в сформировывавшуюся внутрикарьерную среду.

Пятый этап – оценка сеточной сходимости, то есть определение точности полученного решения уравнений, входящих в математическую модель, осуществляется с помощью стандартного монитора, представленного на рисунке 4.3 [128,148]. Он представляет собой визуализацию изменения невязок уравнений. Нелинейные уравнения движения среды решаются методом итераций, которые представляет собой расчетную величину временного шага. Решение заканчивается (устанавливается), когда изменение всех расчетных величин, в

том числе и интегральных, от итерации к итерации становится достаточно малым. Для улучшения процесса сходимости решения задается большее количество итераций или изменяются характеристики расчетной сетки [129]. Для решения различных задач показатель итераций изменялся от 10000 до 50000 для обеспечения сходимости.

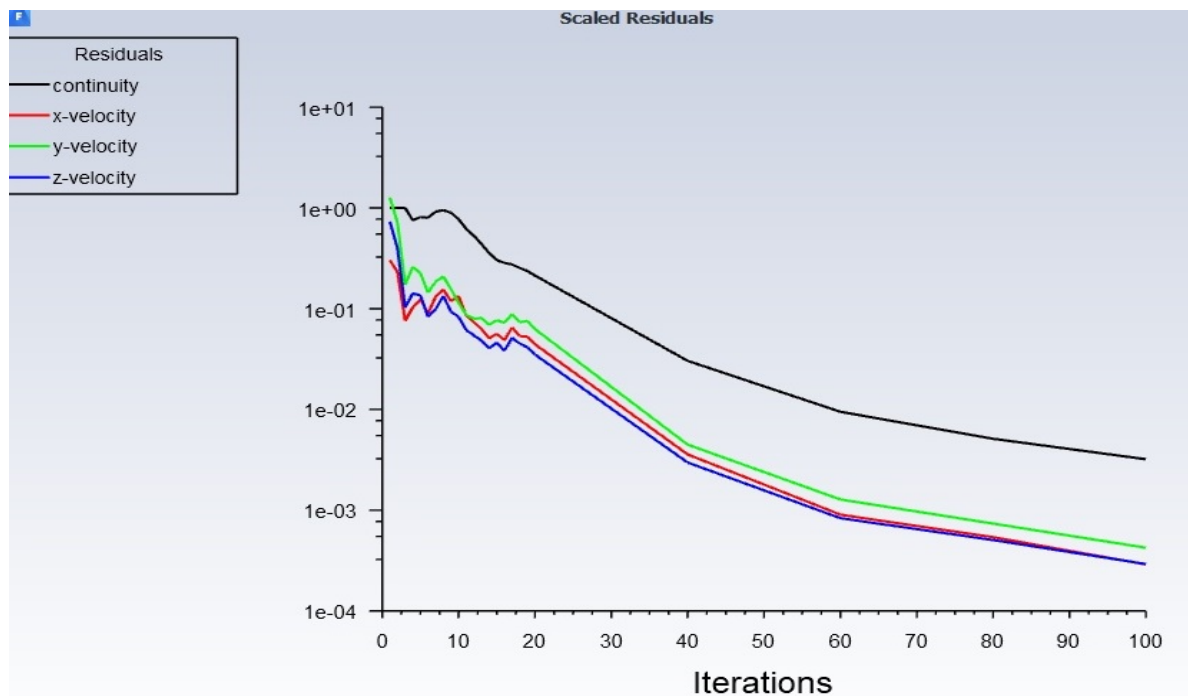


Рисунок 4.3 - Монитор контроля решения (невязки).

## 4.2 Верификация аэродинамической модели Ansys Fluent

Верификация аэродинамической модели карьера проводилась путем сравнения экспериментальных данных с результатами математического моделирования. Перед проведением математического моделирования были заданы исходные параметры воздушного потока, пересекающего карьерное пространство, а также воздушной среды, сформированной внутри границ карьера [130,150]. Исходные параметры для моделирования представлены в таблице 4.1. Параметры для воздушного потока, протекающего по Земной поверхности, были определены на основании данных метеостанции расположенной вблизи разработки месторождения полезных ископаемых [131,158]. Что касается воздушной среды, сформированной в карьере, то параметры температуры и скорости движения были определены как среднестатистические значения из полученных результатов натурального исследования в трех специально отобранных точках в карьере.



Таблица 4.1 – Исходные параметры для математического моделирования

Дата	Воздушный поток на Земной поверхности			Воздушная среда внутри карьера	
	Направление движения	Температура, °С	Скорость движения, м/с	Температура, °С	Скорость движения, м/с
13.08.2021	Север	9,7	3	11,0	2
11.08.2021	Север	12,9	6	15,1	5
09.08.2021	Восток	13,9	7	16,6	4
06.08.2021	Запад	12,9	5	15,1	6
02.08.2021	Север	12,8	3	15,8	5
30.07.2021	Север	12,5	5	15,6	6
26.07.2021	Восток	11,5	4	11,8	2
24.07.2021	Восток	12,4	6	14,1	4
21.07.2021	Восток	11,4	4	13,1	1
17.07.2021	Запад	12,5	3	13,1	4
14.07.2021	Восток	11,5	3	12,3	3
12.07.2021	Восток	10,5	7	10,9	1
08.07.2021	Юг	11,2	2	11,8	7
05.07.2021	Восток	11,4	2	12,5	3
01.07.2021	Запад	11,6	3	12,8	2
28.06.2021	Север	14,6	4	16,4	1
22.06.2021	Север	9,4	5	10,1	2
19.06.2021	Север	12,1	4	13,4	2
15.06.2021	Запад	8,2	1	10,1	3

В результате разработки аэродинамической модели карьерного пространства, которая отражает текущее положение горных работ на месторождении, было проведено математическое моделирование с учетом входных параметров двух сред. Модель карьера, разработанная в программном комплексе SpaceClaim, представлена на рисунке 4.4.

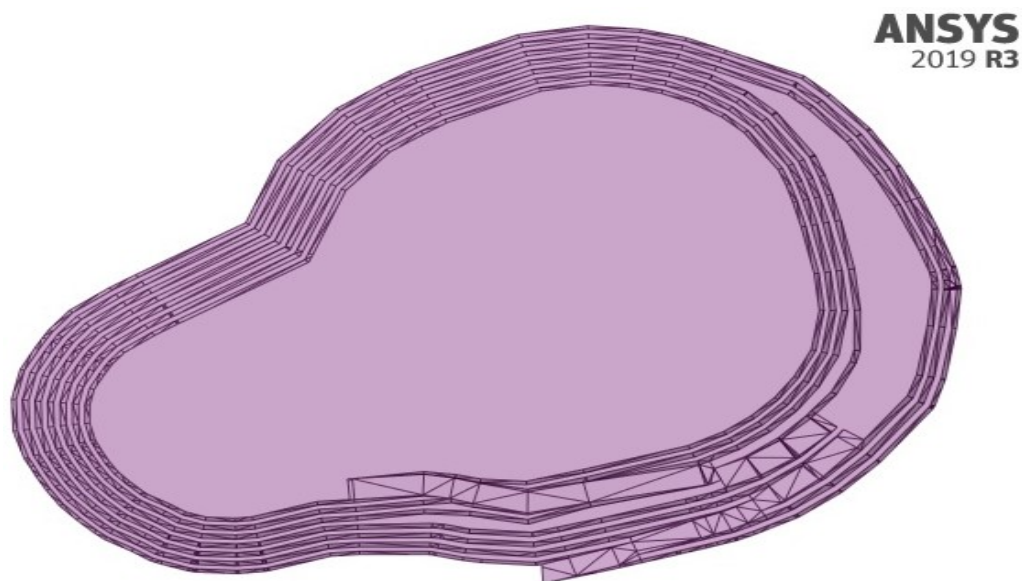


Рисунок 4.4 - Аэродинамическая модель карьерного пространства

В результате математического моделирования были получены скоростные и температурные поля, формирующиеся в процессе взаимодействия двух сред. Результат моделирования одного из условий представлен на рисунке 4.5.

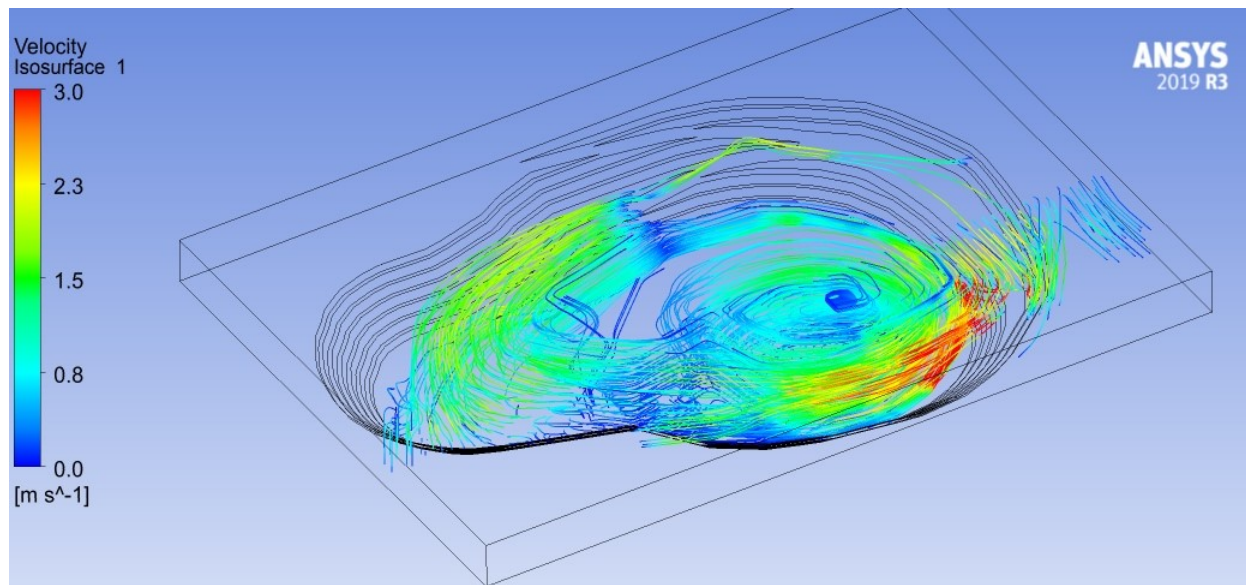


Рисунок 4.5 - Скоростное поле внутри границ карьерного пространства для условия 1 из таблицы 4.1.

После чего был выполнен сравнительный анализ результатов температуры и скорости в контрольных точках карьера с результатами натуральных исследований. Результат анализа представлен в таблице 4.2. Из него следует, что среднее отклонение между результатами натуральных измерений и математическим моделированием для температуры и скорости движения воздушного потока составляет 5% и 4% соответственно.

Таблица 4.2 – Результаты натуральных исследований и математического моделирования

Дата	Натурное исследование						Математическое моделирование						Погрешность	
	Температура, °C			Скорость движения, м/с			Температура, °C			Скорость движения, м/с				
	П1	П2	П3	П1	П2	П3	П1	П2	П3	П1	П2	П3	T, °C	V, м/с
13.08.2021	10,5	11,4	11,2	2	1	3	9,7	12,5	12,1	1,9	0,95	2,95	8%	4%
11.08.2021	15,0	15,0	15,3	5	5	5	13,7	13,6	15,2	4,8	5,1	4,9	7%	3%
09.08.2021	14,7	18,6	16,5	3	4	5	15,2	17,1	16,7	3,1	4,3	4,7	4%	6%
06.08.2021	14,0	15,0	16,3	5	7	7	13,1	13,8	16,5	5,1	7,5	7,1	6%	3%
02.08.2021	16,6	16,2	14,7	6	5	4	16,2	15,4	14,5	5,7	4,7	4,3	3%	6%
30.07.2021	16,8	16,1	14,0	5	5	7	15,5	16,5	13,1	4,6	4,9	7,6	6%	6%
26.07.2021	11,7	11,9	11,7	3	2	2	12,1	12,6	11,5	2,8	1,95	2,1	4%	5%
24.07.2021	13,4	14,6	14,3	4	4	5	13,5	14,9	14,8	3,9	4,1	5,3	2%	4%
21.07.2021	12,1	14,1	13,2	4	4	3	12,9	15,1	14,1	4,3	4,3	3,2	6%	7%
17.07.2021	13,7	13,2	12,5	3	3	4	14,7	14,2	13,5	3,2	3,1	4,1	7%	4%
14.07.2021	13,6	12,4	10,9	1	2	1	13,1	13,2	11,1	1,1	1,9	1	4%	5%

Продолжение таблицы 4.2

Дата	Натурное исследование						Математическое моделирование						Погрешность	
	Температура, °С			Скорость движения, м/с			Температура, °С			Скорость движения, м/с				
	П1	П2	П3	П1	П2	П3	П1	П2	П3	П1	П2	П3	T, °С	V, м/с
12.07.2021	10,0	11,0	11,6	9	7	5	10,5	11,8	11,8	9,1	6,9	5,1	4%	2%
08.07.2021	11,7	12,5	11,3	2	3	3	11,1	12,4	12,3	2,1	3,1	3,2	5%	5%
05.07.2021	12,2	13,2	12,2	2	2	3	11,4	12,1	11,1	1,9	1,95	2,8	9%	5%
01.07.2021	13,1	14,8	10,4	1	1	2	14,1	14,9	10	1	0,98	1,85	4%	3%
28.06.2021	16,2	15,0	17,9	2	2	2	17,2	15,4	16,8	2,2	1,95	1,9	5%	6%
22.06.2021	8,7	9,8	11,8	2	4	1	8,1	10,1	11,1	1,9	3,95	0,98	6%	3%
19.06.2021	14,0	13,4	12,8	4	1	3	13,1	13,8	12,5	4,1	0,95	3	4%	3%
15.06.2021	10,2	10,3	9,8	1	2	3	10,5	10,8	10,1	1	1,85	3,1	3%	4%

#### 4.3 Оценка влияния аэродинамических процессов на экологическую обстановку в карьере золоторудного месторождения

В процессе разработки месторождения рудничная атмосфера на постоянной основе подвергается воздействию загрязняющих веществ, образующихся в процессе осуществления различных технологических операций [132]. К этим операциям относятся выемочно-погрузочные работы, выполняющиеся крупногабаритной карьерной техникой, транспортировка горнорудной массы большегрузными самосвалами и взрывные работы. В результате это приводит к повышению в карьерном воздухе концентраций загрязняющих веществ, величины которых постоянно увеличиваясь, через определенный промежуток времени могут превышать предельно допустимые значения, что в свою очередь оказывает негативный эффект на здоровье горнорабочих и приводит к большим экономическим потерям [133,151].

Для подтверждения выдвинутой гипотезы, касательно ухудшения аэрологической обстановки с течением времени, вследствие выполнения технологических операций в карьере, необходимо провести математическое моделирование процесса формирования аэродинамических условий в карьере и на основе полученных результатов: во-первых, идентифицировать места образования зон рециркуляционного движения воздушных масс; во-вторых, оценить опасность наличия данных зон в карьере с точки зрения возможности накопления в них объемов загрязняющих и вредных примесей [134].

Перед выполнением математического моделирования были заданы следующие граничные условия:

*Воздушный поток, поступающий в карьер извне:*

Движение по направлению простирания рудной залежи (вдоль оси Y) со скоростью 10 м/с, давлением 0,1 МПа и температурой, равной 303 К.

*Воздушная среда, сформировавшаяся в карьере:*

Сформировавшаяся среда внутрикарьерного пространства стационарна и находится без движения. Давление приравнено к атмосферному и составляет 0,1 МПа. Температура равна 262 К.

*Источник загрязнения:*

Принято следующее допущение: в карьерном пространстве ведутся работы по выемке полезного ископаемого только на одном из горизонтов, который расположен на глубине 560 метров от Земной поверхности. В работе задействованы два выемочно-погрузочных комплекса, состоящие из электрических экскаваторов и большегрузных автосамосвалов (грузоподъемность 200 тонн). Согласно паспортным данным для данного типоразмера автосамосвалов за 1 секунду работы ДВС в атмосферу поступает 0,47 грамм угарного газа (СО). Так как в работах задействовано три автосамосвала, то за 1 секунду в атмосферу поступает 1,42 грамма угарного газа (СО). Место расположение источника и направление движение вредных веществ представлено на рисунке 4.6. Скорость движения составляет 1 м/с. Также следует отметить, что источник данного типа классифицируется как площадной, так как объем вредных веществ поступает равномерно со всей рабочей площади обрабатываемого горизонта.

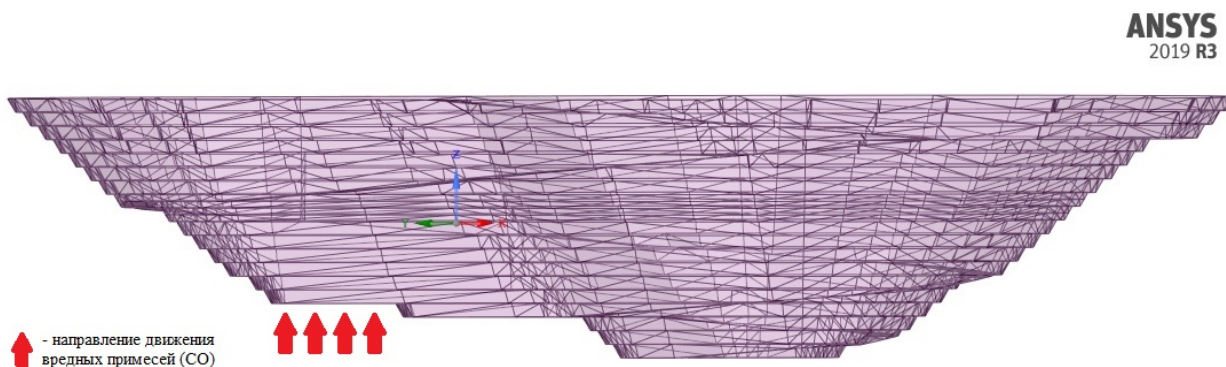


Рисунок 4.6 - Фронтальная проекция 3D модели карьера с иллюстрацией направления движения вредных примесей

Так как в моделируемых аэродинамических условиях показатель температуры не изменяется, то плотность для рассматриваемых сред принята за постоянное значение и составляет  $1,25 \text{ кг/м}^3$ .

После задания граничных условий было выполнено математическое моделирование аэродинамических процессов в карьере, в результате чего, получено поле скоростей, представленное на рисунке 4.7. Цветовая кодировка на рисунке характеризует диапазон изменения скорости движения воздушного потока, пересекающего карьерное пространство, в интервале от 1 до 10 м/с. Из поля скоростей следует, что метеорологические параметры

воздушного потока, благодаря теплофизическим свойствам в процессе взаимодействия со сформировавшейся воздушной средой в карьере, начинают изменяться. Скорость потока извне начинает постепенно уменьшаться и достигает скорости равной 2,5 м/с. Снижение скорости является следствием уменьшения температуры и повышения плотности воздушного потока. В результате, траектория движения потока изменяется и площадь омывания, преимущественно наветренной стороны карьера, увеличивается. При этом с подветренной стороны карьера формируется застойная зона, где скорость движения значительно отличается от общего объема внутрикарьерного пространства и изменяется в диапазоне от 2,5 до 0 м/с. Для анализа влияния образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс на аэрологическую обстановку в карьере с точки зрения степени загрязнения атмосферы, необходимо рассмотреть результат взаимодействия трех исследуемых сред: 1) воздушный поток, поступающий в карьер; 2) воздушная среда, сформировавшаяся в карьере; 3) источник загрязнения в виде угарного газа;

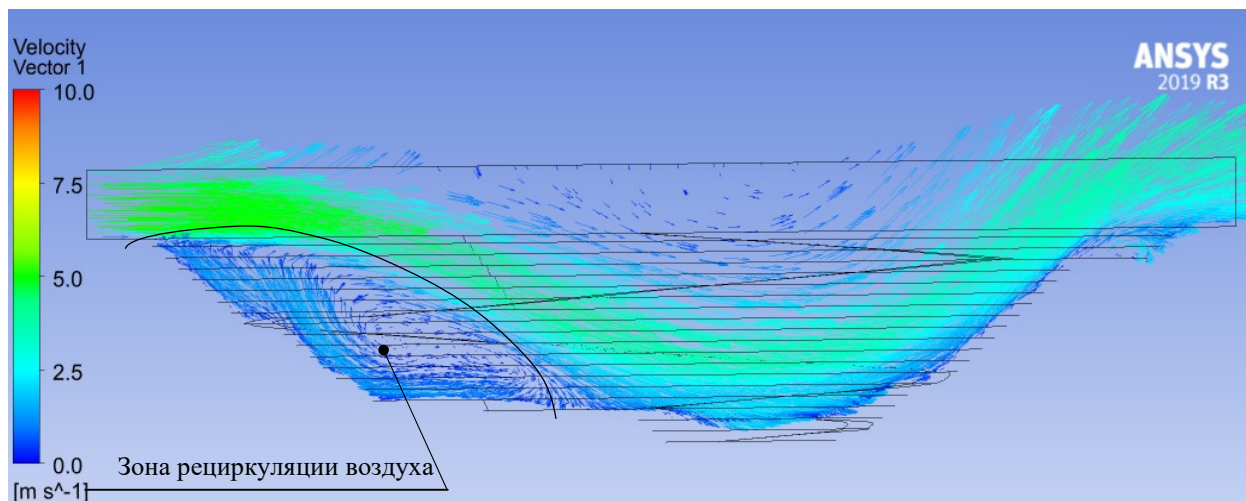


Рисунок 4.7 - Поле скоростей внутрикарьерном пространстве при движении воздушного потока со скоростью 10 м/с

На рисунке 4.8 представлен результат взаимодействия трех исследуемых сред в карьере. Цветовая индикация определяет две из трех рассматриваемые среды. Воздушная среда, сформировавшаяся в карьере, представлена темно-синим цветом. Данный цвет определяется диапазоном значений от 0 до 0,1 согласно факторной шкале, представленной на рисунке 4.8. Источник загрязнения, который принят за угарный газ, представлен темно-красным цветом и согласно факторной шкале, данной среде соответствуют значения от 0,9 до 1,0. Из результатов математического моделирования следует, что генерируемый объем загрязняющих веществ (угарный газ) изначально перемещается в вертикальном направлении и, с течением времени, после активного взаимодействия с потоком воздуха, пересекающего карьерное пространство, малая часть объема угарного газа начинает перемещаться по направлению движения этого

потока, тем самым происходит процесс выноса объема вредных примесей за границы карьера, однако, большая часть остается с подветренной стороны карьера и начинает циркулировать. В процессе взаимодействия объем угарного газа планомерно увеличивает площадь омываемых горизонтов с подветренной стороны карьера, что приводит к ряду ограничений с точки зрения доступа рабочего персонала с целью проведения выемочно-погрузочных работ на вышележащих горизонтах.

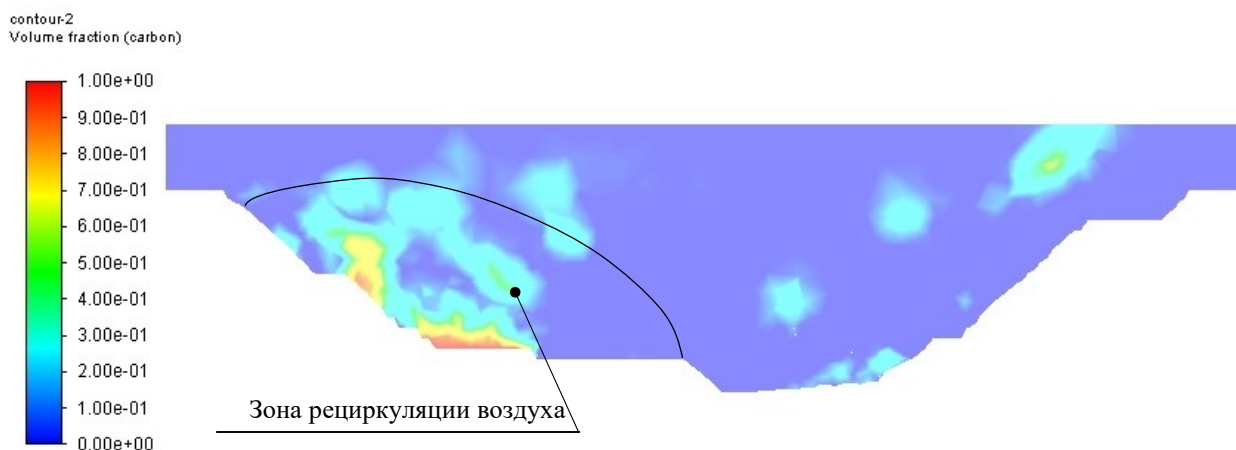


Рисунок 4.8 - Результат взаимодействия трех исследуемых сред в карьерном пространстве

Концентрация загрязняющих веществ и вредных примесей на рабочем горизонте, где расположен источник генерирования вредностей, с течением времени начинает возрастать. На основании результатов математического моделирования установлено, что на 47 минуте отслеживания динамики изменения аэрологической обстановки в карьере, значение концентрации угарного газа начинает превышать предельно допустимое значение равное  $20 \text{ мг/м}^3$ . Это условие также указывает на то, что в данной зоне не обеспечивается аэрологическая безопасность за счет применения естественной вентиляции в карьере. Динамика изменения концентрации угарного газа на рабочем горизонте представлена на рисунке 4.9. Из нее следует, что уровень концентрации угарного газа (CO) в течение одного часа возрастает с 0,008 до  $25,3 \text{ мг/м}^3$ . Для нормализации параметров рудничной атмосферы требуется выработка корректирующих мероприятий и контроль точного соблюдения технологического регламента производства.

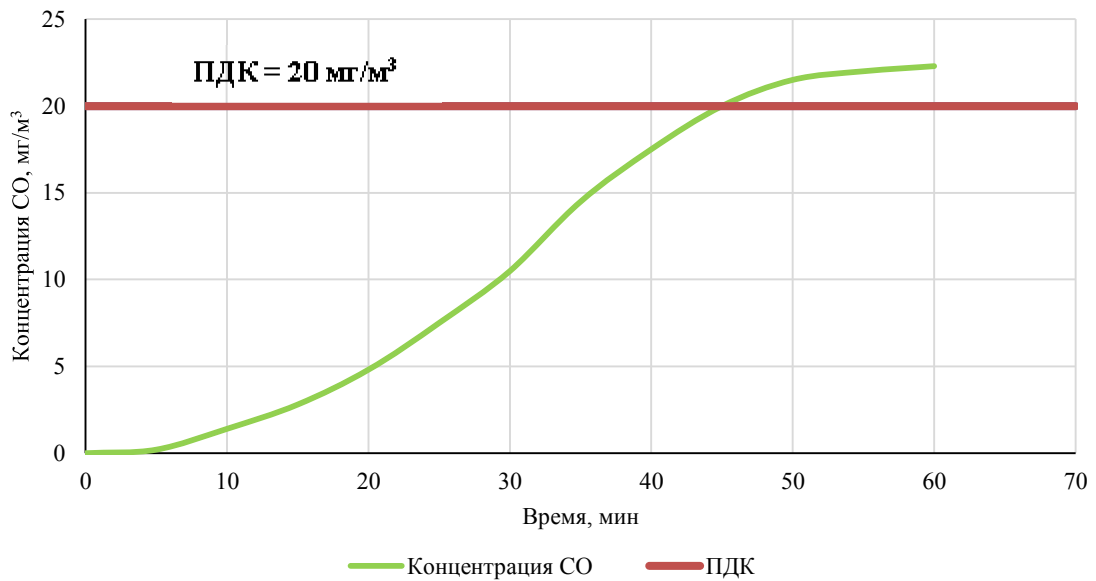


Рисунок 4.9 - Динамика изменения концентрации угарного газа на рабочем горизонте

#### 4.4 Оценка эффективности естественного проветривания на различных этапах развития золоторудного месторождения

Естественная вентиляция является наиболее часто применяемым методом нормализации параметров рудничной атмосферы после проведения ряда технологических операций. В результате в карьерном пространстве образуется поле скоростей, которое определяет аэрологическую обстановку в карьере [135]. При этом каждый этап разработки месторождения характеризуется своими особенностями ведения добычных работ, что также оказывает влияние на формирование аэрологических условий. Исследование аэродинамических процессов в карьере при помощи математического моделирования позволит на каждом из этапов развития месторождения выявить условия развития рециркуляционных и застойных воздушных зон при увеличении глубины ведения добычных работ [36,152].

Перед проведением моделирования необходимо подготовить аэродинамическую модель карьерного пространства. Для этого, на основании методических положений [136] представляется возможным каждый последовательный этап отработки месторождения, характеризующийся типом проветривания и определенной схемой движения воздушных потоков, классифицировать по величине отношения глубины карьера к его плановым размерам (величина по длинной оси). Использование предлагаемого подхода позволило дифференцировать разработку рассматриваемого месторождения на 3 этапа, характеризующихся соответствующими геометрическими параметрами [34]:

1) при условии  $H/L_n \leq 0,1$  - глубина карьера составляет 100 м, длина по простиранию – 1000 м, вкрест простирания – 500 м, длина по простиранию на дне – 800 м, вкрест простирания на дне – 100 м, углы откоса по лежачему и висячему борту –  $55^\circ$ .

2) при условии  $0,1 < H/L_n < 0,2$  - глубина карьера составляет 260 м, длина по простиранию – 1300 м, вкрест простирания – 600 м, длина по простиранию на дне – 600 м, вкрест простирания на дне – 150 м, углы откоса по лежачему и висячему борту –  $55^\circ$ .

3) при условии  $H/L_n \geq 0,2$  - глубина карьера составляет 590 м, длина по простиранию – 1400 м, вкрест простирания – 700 м, длина по простиранию на дне – 300 м, вкрест простирания на дне – 175 м, углы откоса по лежачему и висячему борту –  $55^\circ$ .

При моделировании естественной вентиляции, направление движения воздушного потока было задано вдоль простирания рудной залежи, а именно по оси Y со средней скоростью 5 м/с, плотностью воздуха  $1,2 \text{ кг/м}^3$ , давлением 0,1 МПа и температурой 248 К.

На основании полученных результатов установлено, что для начального этапа разработки месторождения в карьере имеет место прямоточная схема движения воздушных потоков. Представленная на рисунке 4.10 цветовая кодировка характеризует скоростной режим воздушных масс, протекающих в пределах границ карьерного пространства. С увеличением глубины разработки величина скорости воздушного потока стремиться к нулевому значению у поверхности горизонта, находящегося на глубине 100 м. Тем не менее, в рассматриваемых условиях будет обеспечиваться полноценный вынос за границы карьера всего объема загрязняющих веществ, образующихся в процессе разработки месторождения. Это подтверждается данными расчетов, представленными на рисунке 4.10, которые свидетельствуют о незначительном отличии в траекториях движения воздушных масс при пересечении открытых площадок и карьерного пространства.

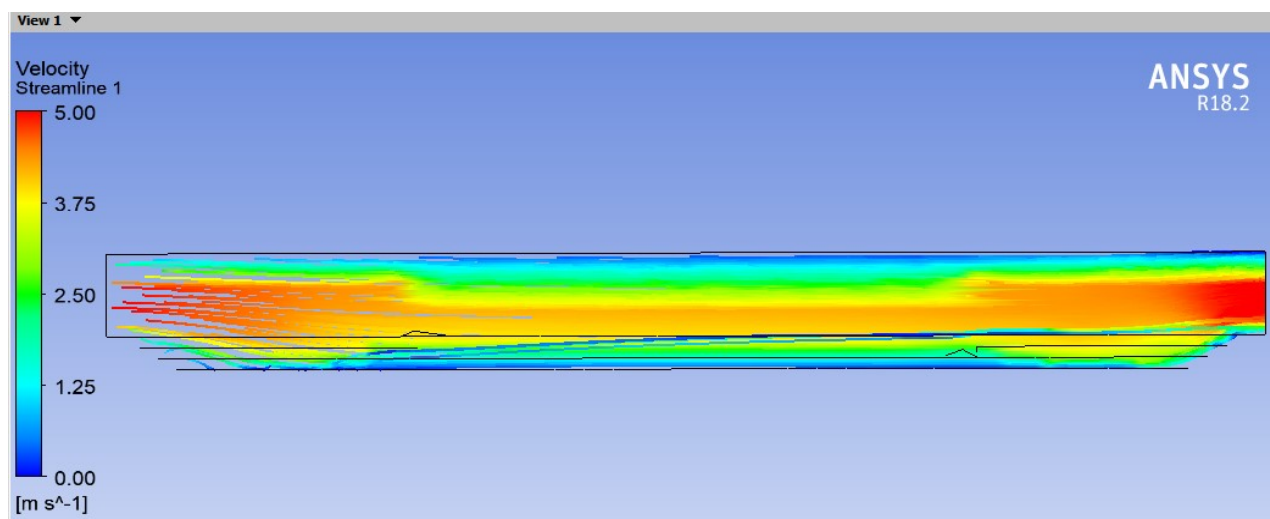


Рисунок 4.10 - Иллюстрация распределение скоростного поля в пространстве для 1 этапа разработки месторождения



При углублении горных работ до 260 м (второй этап разработки) данные вычислений свидетельствуют о возникновении рециркуляционно-прямоточной схемы движения воздушных потоков. Результат аэродинамической картины представлен на рисунке 4.11. Несмотря на образование рециркуляционной области со стороны подветренного борта карьера, составляющей около 30% от общего отработанного пространства, условия проветривания рабочей зоны изменяются несущественно, так как движение воздушных масс в большей части карьера осуществляется по прямоточной схеме.

Вместе с тем, очевидно, что эффективность естественного воздухообмена снижается, а вынос загрязняющих веществ, примесей за пределы карьерного пространства затрудняется.

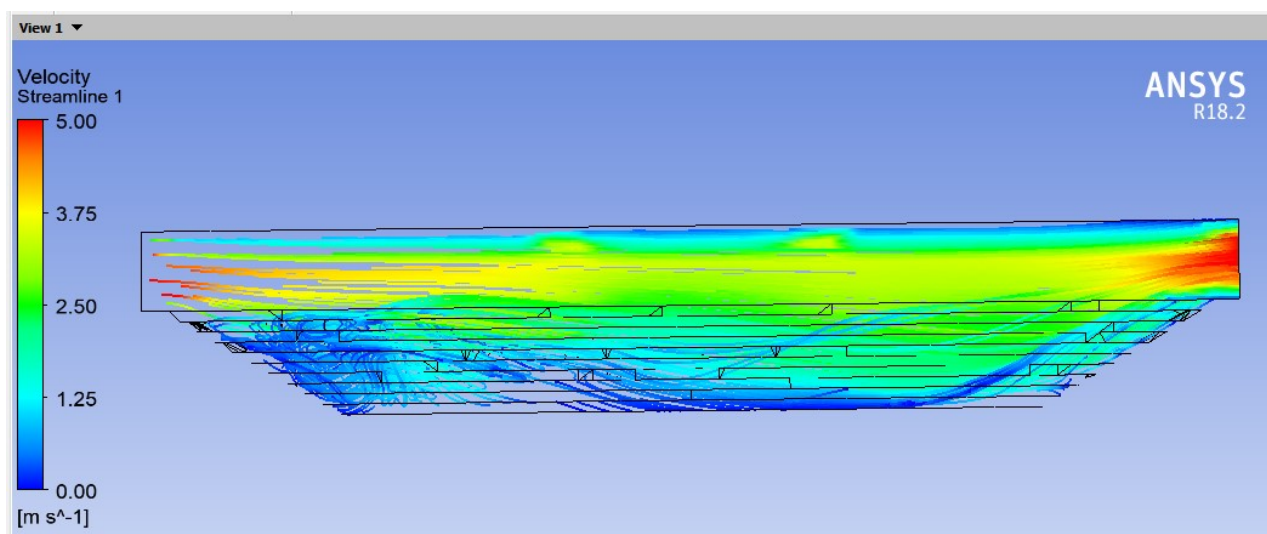


Рисунок 4.11 - Иллюстрация распределение скоростного поля в пространстве для 2 этапа разработки месторождения

Анализ результатов математического моделирования показал, что для третьего завершающего этапа разработки месторождения характерна рециркуляционная схема движения воздушных потоков, представленная на рисунке 4.12. При этом, развитие обширных зон рециркуляции воздуха прослеживается по всему объему выработанного пространства. Основной объем таких зон формируется со стороны подветренного борта карьера и составляет почти 70% от общего отработанного пространства в карьере.

В рассмотренных условиях эффективность проветривания нижней части карьера потоками воздуха формирующиеся за счет естественных ветровых потоков снижается, что не обеспечивает полноценный вынос за границы карьерного пространства всего объема загрязненного воздуха.

Таким образом, при повышении глубины горных работ более, чем на 260 м, для нормализации параметров карьерного воздуха необходимо использование дополнительных инженерно-технических мероприятий.

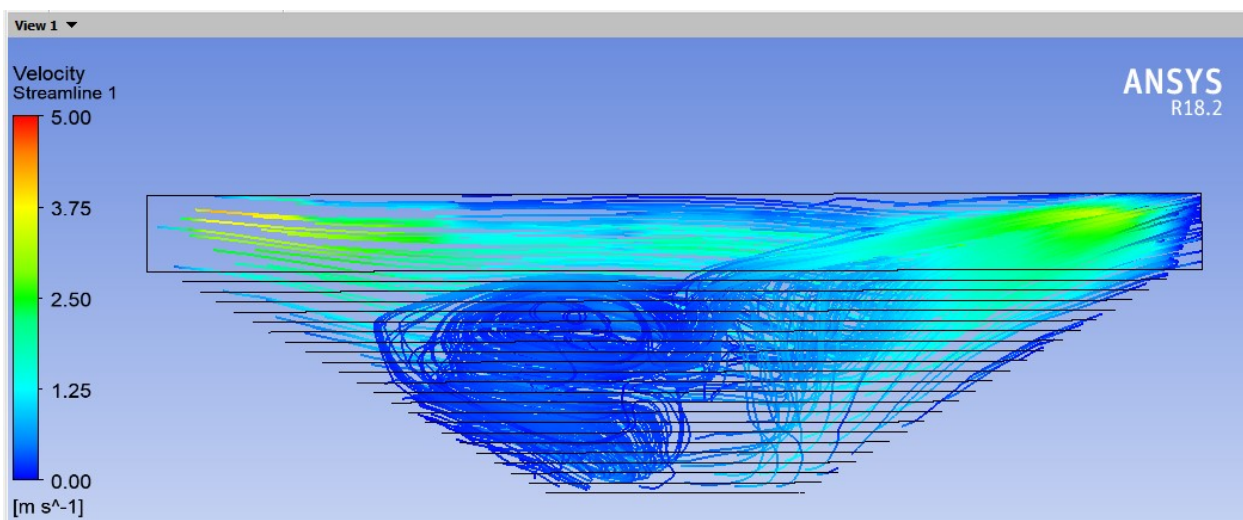


Рисунок 4.12 - Иллюстрация распределение скоростного поля в пространстве для 3 этапа разработки месторождения

#### 4.5 Оценка влияния температурных условий на эффективность естественного проветривания в карьере золоторудного месторождения

В процессе разработки месторождения внутри границ карьерного пространства формируются аэродинамические процессы, которые характеризуются образованием зон рециркуляционного движения воздушных масс, а также температурными инверсиями [139]. Имеется ряд факторов, оказывающих влияние на данный процесс, одним из таких является температура. Для оценки формирующихся в карьере аэродинамических условий, характеризующих эффективность естественной вентиляции, необходимо провести математическое моделирование движения воздушных потоков, образующихся с учетом различных температурных градиентов воздушной среды [137,153]. Для этого были заданы следующие граничные условия:

*Воздушный поток, поступающий в карьер извне:*

Движение по направлению простирания рудной залежи (вдоль оси Y) со скоростью 5 м/с, давлением 0,1 МПа и температурой, соответствующей значениям столбца «Температура 1» в таблице 4.3.

*Воздушная среда, сформировавшаяся в карьере:*

В данном случае рассматривается среда, сформировавшаяся в приземном слое атмосферы. Таким образом, принято следующее *допущение* для данного исследования:

1) температура приземного слоя равна температуре горных пород, слагающих поверхность карьерного пространства;

2) пренебрегается неравномерность нагрева различных участков карьера, которые создают условия для возникновения температурных неоднородностей.

Сформировавшаяся среда внутрикарьерного пространства стационарна и находится без движения. Давление приравнено к атмосферному и составляет 0,1 МПа. Температура соответствует значениям столбца «Температура 2» в таблице 4.3.

Плотность двух рассматриваемых сред задана как дифференцированный показатель, величина которого меняется в зависимости от установившегося температурного градиента среды. В таблице 4.3 представлен результат выполненной декомпозиции максимальных (положительных и отрицательных) значений температуры на равные интервалы относительно установившегося среднестатистического годового значения температуры с целью определения влияния разности температур, между воздушным потоком и атмосферой карьера, на интенсивность образования температурных инверсий и, как следствие, застойных зон в карьере.

Таблица 4.3 - Температурные условия среды и потока воздуха

Температура 1, (Кельвин)	Температура 2, (Кельвин)	Температурный градиент на каждые 100 м, (К/м*100)
303,15	262,33	-6,3
293,15	262,33	-4,7
283,15	262,33	-3,2
273,15	262,33	-1,7
262,33	262,33	0,0
253,15	262,33	1,4
243,15	262,33	3,0
233,15	262,33	4,5
228,64	262,33	5,2

В результате математического моделирования было установлено, что для завершающего этапа развития месторождения, вследствие взаимодействия двух исследуемых сред (поступающего потока воздуха извне и внутрикарьерной атмосферы) внутрикарьерном пространстве, характерно образование различных аэродинамических картин. Каждое моделируемое условие приводит к образованию аэродинамических процессов в карьере. Характер перемещения воздушных масс в карьере отличается в зависимости от заданных граничных условий. Граничные условия характеризуют ряд параметров и переменных, которые используются для решения поставленной задачи аэродинамики, и при этом ключевым параметром в расчете является температура потока воздуха и карьерной атмосферы, которая в свою очередь оказывает влияние на изменение параметров скорости, плотности и направления движения воздушных масс. Также температура определяет условия формирования стратификации в изменяющейся атмосфере, которая показывает динамичность распределения температуры воздуха с глубиной. Различные комбинации изменения температуры по глубине

возможны вследствие непостоянства температурного поля, как во времени, так и в пространстве самого карьера, а также из-за переменного температурного режима поверхностного воздушного потока. Формирующееся скоростное и температурное поле характеризует величину установившегося температурного градиента на различных высотных отметках, на основании которого возможно определение соответствующего типа температурной инверсии [35].

В результате выполненного исследования было установлено, что для каждого из моделируемого температурного условия характерно образование определённого типа инверсии. Исследуемое явление в виде инверсии при определенных условиях проявляется как в большей, так и меньшей степени. Внутрикьерном пространстве преобладает три формы инверсии: с положительным, нулевым и отрицательным температурным градиентом. Полученные аэродинамические картины для каждого типа инверсии представлены на рисунке 4.13 - 4.15.

Инверсия с положительным температурным градиентом указывает на то, что сформировавшаяся среда в карьере теплее поступающего потока воздуха извне. В результате взаимодействия двух сред формируется скоростное поле, представленное на рисунке 4.13. Изображенная цветовая кодировка характеризует скоростной режим воздушных масс, протекающих в пределах границ карьерного пространства. Основываясь на результатах моделирования, можно сделать вывод, что поступающий в карьер поток воздуха, имея температурную неоднородность и слоистую структуру, разделяется на две составляющие: во-первых - это слои воздуха, наиболее приближенный к краевой зоне потока. Именно эти слои принимают участие в первоначальном взаимодействии с тёплой средой внутри карьера, поэтому на начальном этапе формирования аэродинамической картины наблюдаются потоки воздуха со скоростными параметрами от 3 м/с до 5 м/с, которые пересекают карьерное пространство по верхней его границе. Во-вторых - это слои воздуха, наиболее приближенные к центральной направляющей оси потока. Эти слои, вследствие своих теплофизических свойств, имея более низкую температуру, движутся по нисходящей траектории, пересекая карьерное пространство, и начинают концентрироваться в донной части карьера. Такое условие может привести к развитию застойных зон и зон обратного движения воздушных масс, которые потенциально опасны для накапливания вредных и загрязняющих примесей. Однако, так как в карьере сформирована среда с более высокой температурой, то в результате взаимного теплообмена, температура поступившего воздуха повышается, его плотность снижается, а скорость возрастает, таким образом, поток воздуха меняет траекторию движения и развиваются восходящие потоки, способствующие перемещению воздушных масс в карьере. Наиболее ярко описанное явление наблюдается со стороны подветренного борта карьера.

На основании сформировавшейся аэродинамической картины установлено, что в основном объеме выработанного пространства карьера наблюдается установившийся скоростной режим воздушного потока, равный более 1 м/с. Такое условие способствует практически полностью исключить возможность образования застойных зон вследствие постоянного движения воздушных масс в границах карьерного пространства. Для рассматриваемых условий будет обеспечиваться полноценный вынос за границы карьера всего объема загрязняющих веществ, образующихся в процессе разработки месторождения, так как объем формирующихся зон рециркуляции минимален.

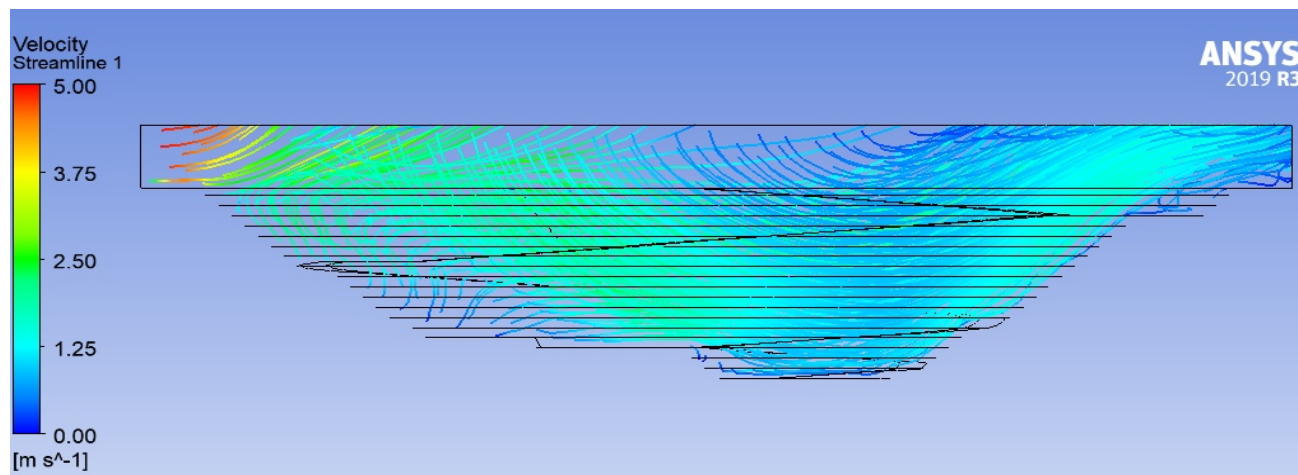


Рисунок 4.13 - Скоростное поле при формировании инверсии с положительным температурным градиентом. Результат соответствует условию 9 из таблицы 4.3.

Инверсия с нулевым температурным градиентом является промежуточным звеном между инверсией с положительным и отрицательным температурным градиентом. В результате взаимодействия двух сред формируется скоростное поле, представленное на рисунке 4.14. Изображенная цветовая кодировка характеризует скоростной режим воздушных масс, протекающих в пределах границ карьерного пространства. Особенность текущего условия заключается в том, что на формирование поля скоростей не влияют температура среды и поступающего потока воздуха извне, а влияют только лишь геометрические особенности аэродинамической модели карьерного пространства. Основываясь на результатах моделирования, можно сделать вывод, что в основном объеме выработанного пространства карьера наблюдается установившийся скоростной режим воздушного потока равный 3,5 м/с. Такое условие должно обеспечивать аэрологическую безопасность внутри всего выработанного пространства в карьере. Однако, вследствие геометрических особенностей карьерного пространства и аэрологических параметров воздушного потока, образуется аэродинамический процесс, характеризующийся движением воздушных масс узким фронтом и с малой площадью соприкосновения с поверхностью карьера. Это, в свою очередь, приводит к образованию зон потенциально опасных для накопления вредных и загрязняющих примесей. Так, проблеме

нормализации, явным образом, подвержена подветренная стороны карьера, которая вследствие наличия геометрических особенностей, в виде крутого угла откоса уступа и широкой рабочей площадки, способствует развитию зон рециркуляционного движения воздушных масс. Такое заключение основано на сформировавшейся аэродинамической картине, где можно наблюдать, как с подветренной стороны карьера устанавливается скоростной режим движения воздушных потоков отличный от общего установившегося в основном объеме выработанного пространства, который равен менее 1 м/с. Также, наблюдаются характерные для рециркуляционного типа движения воздушных масс в виде завихрения. Аналогичная аэрологическая ситуация наблюдается и в донной части карьера. Формирование таких условий связано с углубленностью рассматриваемой части карьера в сравнении с другими горизонтами в выработанном пространстве. Что же касается наветренного борта карьера, то в данном случае, воздушный поток без каких-либо препятствий пересекает периметр, и диапазон скоростей в этой части варьируется от 2 м/с до 4 м/с, это в свою очередь способствует обеспечению аэрологической безопасности.

Таким образом, для рассматриваемых условий эффективность естественного воздухообмена снижается, а вынос загрязняющих веществ и примесей за пределы карьерного пространства затрудняется, так как объем образующихся зон рециркуляции возрастает и составляет порядка 10% от общего выработанного пространства.

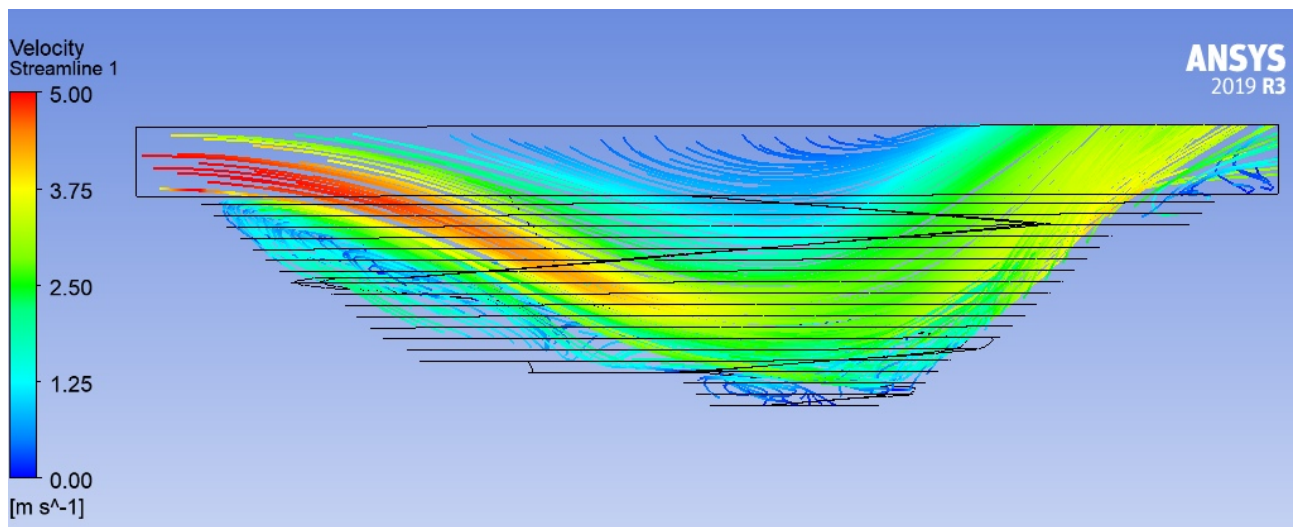


Рисунок 4.14 - Скоростное поле при формировании инверсии с нулевым температурным градиентом. Результат соответствует условию 5 из таблицы 4.3.

Инверсия с отрицательным температурным градиентом указывает на то, что сформировавшаяся среда в карьере холоднее поступающего потока воздуха извне. Скоростное поле, как результат взаимодействия двух сред, представлено на рисунке 4.15. Скоростной режим воздушных масс, протекающих в пределах границ карьерного пространства, характеризуется соответствующей цветовой кодировкой. Основываясь на результатах

моделирования, можно сделать вывод, что поступающий воздушный поток извне, согласно теплофизическим законам, изначально пересекает карьерное пространство по верхней его границе, однако, в процессе взаимного теплообмена со сформировавшейся внутрикарьерной средой, имеющей более низкую температуру, происходит отток тепла из поступающего извне воздуха. Это, в свою очередь, приводит к охлаждению воздушного потока и к нагреванию внутрикарьерной среды. На основании сформировавшейся аэродинамической картины в основном объеме выработанного пространства карьера наблюдается установившийся скоростной режим воздушного потока, равный 2,75 м/с, при этом общие показатели воздушного потока извне начинают изменяться таким образом, что температура понижается, плотность возрастает, а среднестатистический показатель скорости снижается почти в 2 раза и составляет 2,5-3 м/с. Это приводит к тому, что поток воздуха меняет траекторию движения и площадь соприкосновения с поверхностью карьера увеличивается. Формирующиеся аэродинамические условия схожи с рассмотренными выше условиями при образовании инверсии с нулевым температурным градиентом. Аналогичным образом проблеме нормализации явно подвержена подветренная сторона и донная часть карьера. Однако, отличительной чертой текущих условий от рассмотренных ранее является формирующийся уровень опасности, который значительно выше.

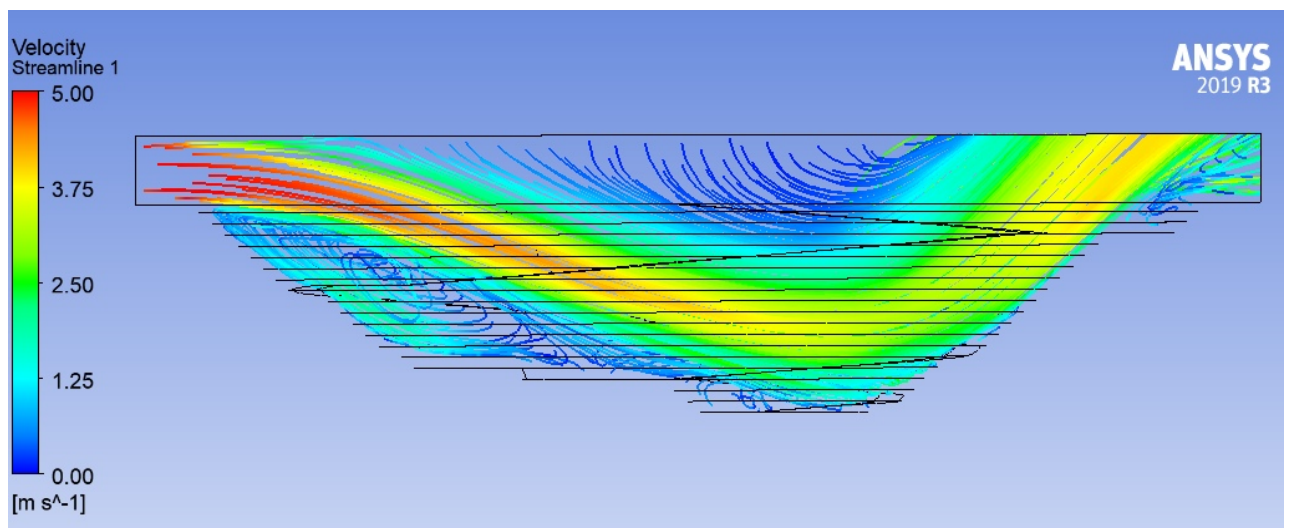


Рисунок 4.15 - Скоростное поле при формировании инверсии с отрицательным температурным градиентом. Результат соответствует условию 1 из таблицы 4.3.

С точки зрения аэрологической безопасности, рассматриваемая область потенциально подвержена накоплению загрязняющих и отравляющих примесей в большей степени, так как объем образующейся зоны рециркуляционного движения воздушных масс составляет порядка 30% от общего выработанного пространства. Как видно из поля скоростного распределения значительная часть слоев воздуха, наиболее приближенных к краевой зоне потока, имеет весьма сниженные скоростные характеристики и, как следствие, низкие значения температуры.

Такие слои воздуха имеют более высокие плотностные характеристики по сравнению с вышележащими воздушными слоями, что, в свою очередь, приводит к скоплению и задержке их в нижней части карьера, способствуя развитию рециркуляционных и застойных зон, которые приводят к снижению интенсивности воздухообмена и, как следствие, к снижению эффективности естественной вентиляции.

Таким образом, для всех результатов моделирования, при задании условий с положительным и отрицательным температурным градиентом, в большей или в меньшей степени характерно снижение эффективности естественной вентиляции. Для определения границы эффективности применения естественной вентиляции в карьере следует рассмотреть результат формирования стратификации в атмосфере, показывающий распределение температуры воздуха в карьерном пространстве по глубине, а также текущее состояние атмосферы. Непостоянство температурного поля, как во времени, так и в пространстве в самом карьере, а также переменный температурный режим поверхностного воздушного потока формируют различные комбинации изменения температуры по высоте, которые можно свести к двум основным типам:

1-й тип – температура воздуха с глубиной возрастает на величину адиабатического градиента температуры ( $\Delta t > 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$ ), что обеспечивает восходящее движение воздушных потоков. Такое состояние атмосферы классифицируется, как неустойчивое и представлено на рисунке 4.16.

2-й тип – наблюдается убывание температуры воздуха с глубиной на величину адиабатического градиента температуры ( $\Delta t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$ ). При таком условии слой воздуха по вертикали весьма устойчив. Результат представлен на рисунке 4.17.

Температурный режим воздушных масс характеризуется соответствующей цветовой кодировкой. Основываясь на результатах моделирования, представленных на рисунке 4.16, установлено, что в общем выработанном пространстве карьера установилось однородное температурное поле, равное 235 К (-38  $^\circ\text{C}$ ). Что касается потенциально проблемной зоны в карьере (подветренный борт), то данная зона характеризуется установившимся температурным режимом, равным 238 К (-35  $^\circ\text{C}$ ). Это означает, что в зоне отсутствуют факторы в виде неравномерности распределения температур, которые обеспечивают образование застойных зон. Также, следует отметить, что температура воздушных слоев, прилегающих к поверхности горизонтов, явным образом, отличается от общего выработанного пространства, что говорит о том, что данные зоны являются началом образования восходящих потоков. В результате, для рассматриваемых условий характерно образование минимального объема зоны рециркуляционного движения воздушных масс.



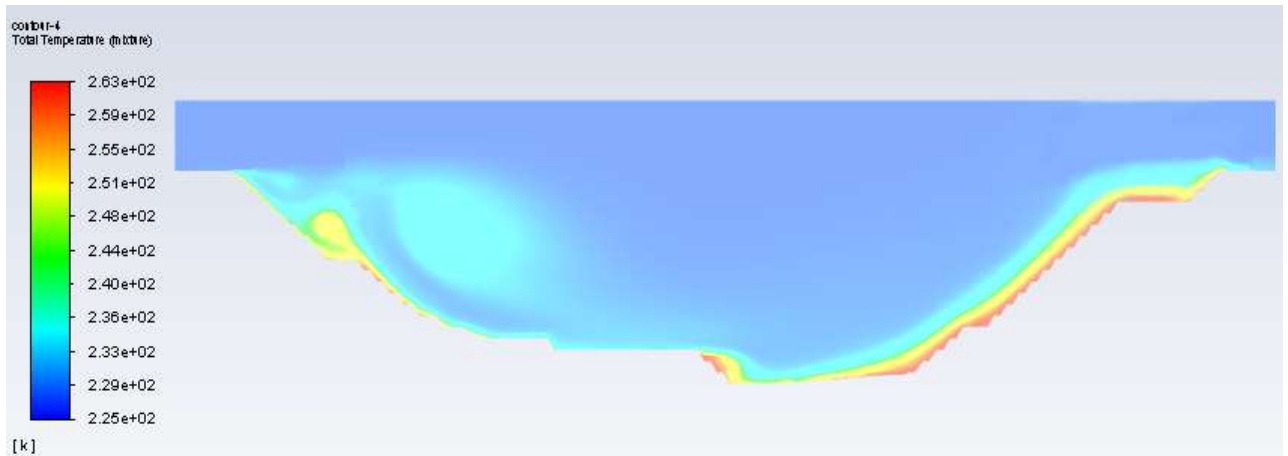


Рисунок 4.16 - Температурное поле при формировании инверсии с отрицательным температурным градиентом. Результат соответствует условию 9 из таблицы 4.3.

Диаметрально противоположная температурная картина представлена на рисунке 4.17. Как видно из результатов моделирования, установившийся температурный режим в общем объеме выработанного пространства изменяется в диапазоне от 262 К до 304 К (от  $-10,8^{\circ}\text{C}$  до  $+31^{\circ}\text{C}$ ) и все же в большем объеме карьера преобладает температурный режим, соответствующий температуре воздушного потока, поступающего извне, равный 304 К ( $+31^{\circ}\text{C}$ ). Однако со стороны подветренного борта и донной части карьера формируется температурное поле отличное от общего выработанного пространства. Именно эти зоны были рассмотрены выше, как области потенциально опасные для накопления загрязняющих и отравляющих примесей. Температура с подветренной стороны карьера варьируется и для более детального анализа проблемной области с точки зрения формирующихся температурных условий построены графические зависимости изменения температуры от глубины карьера и расстояния от верхней его границы. Результат представлен на рисунке 4.18.

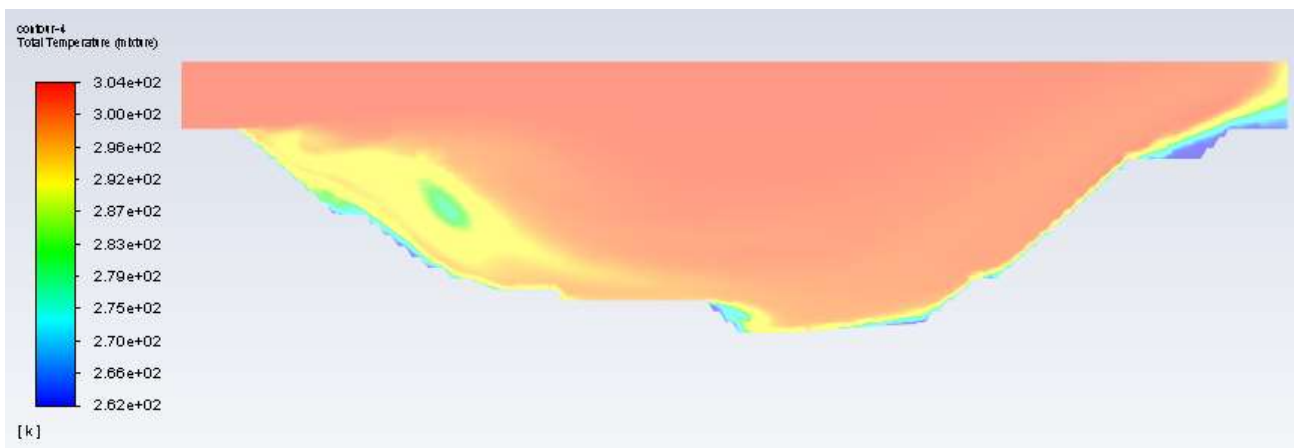


Рисунок 4.17 - Температурное поле при формировании инверсии с отрицательным температурным градиентом. Результат соответствует условию 1 из таблицы 4.3.

Для построения зависимостей, представленных на рисунке 4.18, использовались вертикальные сечения, пересекающие карьерное пространство по глубине. Сечения выполнены

таким образом, чтобы максимально охватить проблемную область подветренной стороны карьера с целью дальнейшего исследования. Для их построения, первоначально, по горизонтали от начальной границы формирования карьера были отложены интервалы в 150, 200, 250, 300 и 350 метров, далее из полученных отступов на уровне Земной поверхности были проведены перпендикуляры в направлении донной части карьера. Как видно из графических зависимостей на рисунке 4.18, полученные сечения отличаются между собой не только расстоянием от верхней границы карьера, но и высотной отметкой по глубине, которая варьируется от 500 до 700 метров.

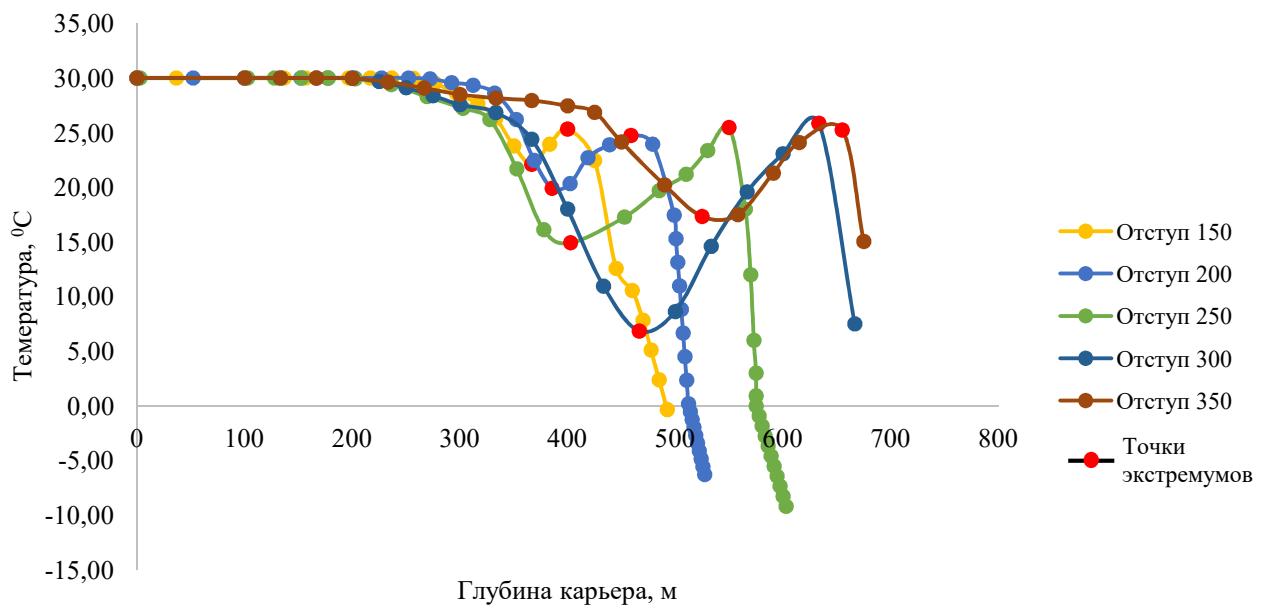


Рисунок 4.18 - Зависимость температуры от глубины и расстояния от верхней границы карьера.

В первую очередь это связано с геометрическими особенностями карьерного пространства, которые определяются морфологическими и геологическими условиями залегания рудной залежи. На основании полученных сечений были построены графики температурного распределения по глубине карьера. Из температурных зависимостей следует, что в исследуемой области температура не однородна и имеет не монотонный вид с экстремумами функции на определённых интервалах глубины. Тенденция ослабления воздушных потоков прослеживается с увеличением расстояния от верхней границы формирования карьерного пространства. Данное утверждение основывается на положении минимальных точек экстремумов, значение которых с увеличением глубины до 470 метров снижается с 25 °C до 7 °C. Что же касается максимальных точек (экстремумов), то это является особенностью распределения температуры в зоне обратных потоков, которая непостоянна как по длине, так и особенно по высоте, что, в свою очередь, определяет своеобразный температурный профиль в приземном слое атмосферы, характеризующийся не уменьшением, а

наоборот увеличением температуры с высотой по мере приближения к поверхности уступа, формирующего карьерное пространство.

Как было отмечено выше, исследуемая зона характеризуется рециркуляционным движением воздушных потоков. Такая зона образуется вследствие формирования отрицательного температурного градиента. Это приводит к ослаблению некоторых слоев воздуха, что влечет к снижению скорости движения по сравнению с вышележащими воздушными слоями и, как следствие, к скоплению и задержке их в карьере. Динамика изменения градиента по глубине представлена на рисунке 4.19.

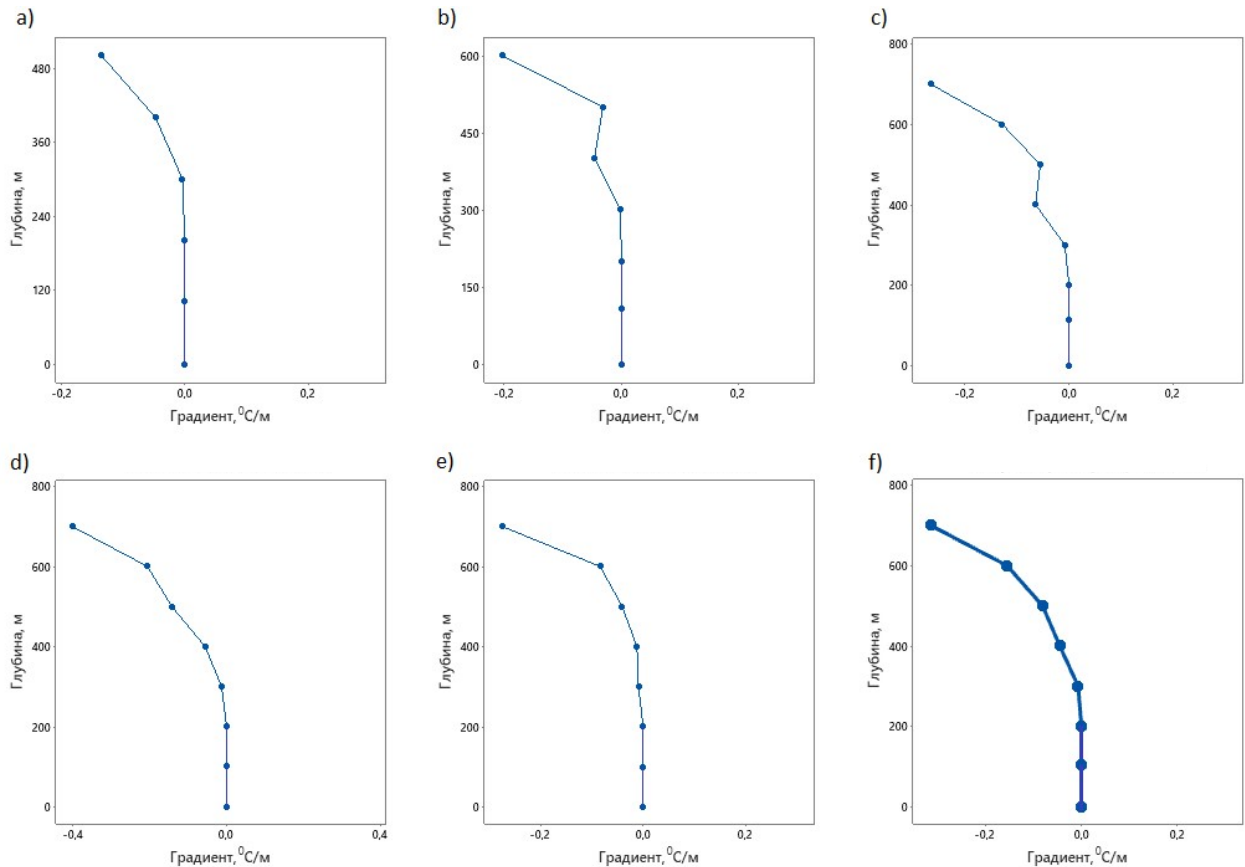


Рисунок 4.19 - Профиль температурного градиента в зависимости от глубины карьера и расстояния (L) от верхней границы карьерного пространства: а) L=150 м; б) L=200 м; в) L=250 м; д) L=300 м; е) L= 350 м; ф) общий свод на расстоянии от 150 м до 350 м;

На рисунке 4.19 представлен профиль изменения температурного градиента в зависимости от глубины карьера и расстояния от начальной границы формирования карьера. Каждый рассмотренный профиль температуры получен исходя из проведенного вертикального сечения по глубине карьера. Исходя из результатов на рисунке 4.19 (a,b,c,d,e), установлено, что диапазон изменения температурного градиента варьируется в интервале от 0 °C/м до -0,4 °C/м, при этом средняя величина изменения температурного градиента на каждые 100 метров глубины отработки месторождения составляет 0,1 °C/м. Также следует отметить, что на рисунке 4.19 (f) с увеличением глубины значение температурного градиента изменяется с

положительного на отрицательное значение, при этом высотная отметка перехода ровная 200 метрам. Это говорит о том, что до высотной отметки в 200 метров температурный режим сформировавшейся среды в карьере однородный. После чего, температура начинает значительно снижаться по сравнению с вышележащими воздушными слоями. Такое условие распределения температур, согласно принятой классификации со стороны Битколова Н.З. и Медведева И.И. [22], можно определить, как инверсия слоистого типа. В таком случае, как было отмечено выше, такое состояние атмосферы является устойчивым.

На рисунке 4.20 представлена сводная графическая зависимость температурного градиента от глубины карьера, характеризующая сводную информацию по температурному градиенту относительно всего объема подветренного борта карьера.

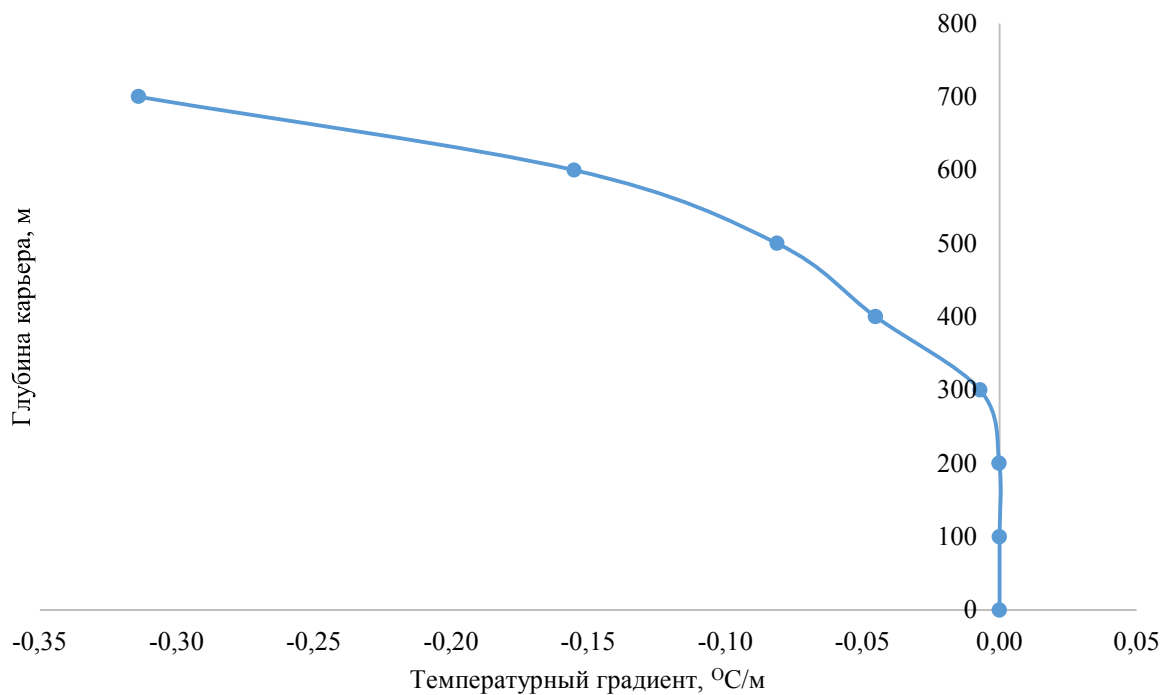


Рисунок 4.20 - Сводный профиль температурного градиента в зависимости от глубины карьера.

Из этого следует, что для исследуемого профиля карьерного пространства характерно образование отрицательного температурного градиента начиная с отметки в 200 метров от верхней границы, соответствующей уровню Земной поверхности. Также можно сделать вывод, что для рассматриваемых условий до глубины карьера в 200 метров обеспечивается эффективное проветривание, как подветренного борта карьера, так и всего выработанного пространства потоками воздуха, формирующимися за счет естественных ветровых потоков. С увеличением глубины эффективность естественной вентиляции начинает значительно снижаться. Об этом свидетельствуют отрицательные показатели температурного градиента, которые начинают формироваться с отметки в 200 метров от уровня Земной поверхности и ниже. В таком случае, полноценный вынос за границы карьерного пространства всего объема

загрязненного воздуха, образующегося в процессе разработки месторождения, не обеспечивается.

Формирующиеся условия оказывают негативное влияние на производственный цикл ведения добычных работ на месторождении. В первую очередь это выражено в незапланированных простоях карьерного оборудования после проведения ряда технологических операций. Одним из временных вариантов минимизации незапланированных простоев техники может быть распределение оборудования, задействованного на добычных работах, с подветренного борта карьера на наветренный борт до момента организации аэрологической безопасности на рабочих горизонтах подветренной части карьера [37, 38].

В результате решения поставленной задачи получены аэродинамические картины, из которых установлена экспоненциальная зависимость образующегося объема застойных зон от сформировавшегося температурного градиента среды внутрикарьерном пространстве, представленная на рисунке 4.21. В данной графической зависимости объем рециркуляционной зоны представлен в процентах по отношению к общему объему выработанного пространства в карьере. Как было упомянуто выше, явление инверсии, выраженное в образовании зон рециркуляционного движения воздушных потоков, наблюдается во всех моделируемых случаях с положительным и отрицательным температурным градиентом и проявляется как в большей, так и в меньшей степени. Из построенной зависимости следует, что с понижением температурного градиента ситуация усугубляется, так как объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс возрастает.

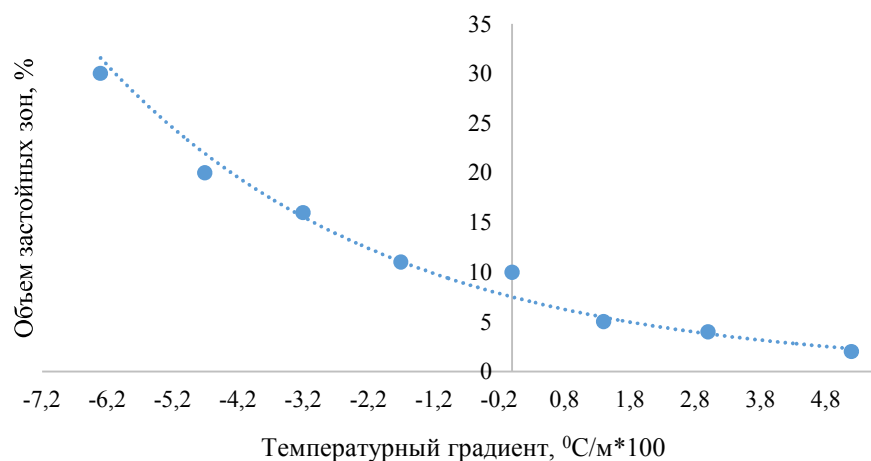


Рисунок 4.21 - Зависимость объема зон рециркуляции от температурного градиента атмосферы.

Следует отметить, что при значении температурного градиента равного  $-6,3 \text{ К/м} \cdot 100$  величина образующихся рециркуляционных зон достигает 30 процентов от общего выработанного пространства в карьере. Однако, наблюдается и обратная ситуация при повышении значения температурного градиента. С увеличением градиента значительно

улучшается аэрологическая ситуация, которая выражена в сокращении зон обратного движения воздушных масс. Так, при значении температурного градиента равного значению  $5,2 \text{ К/м} \cdot 100$  объем образующихся рециркуляционных зон снижается до 2 процентов.

Исходя из приведенной выше статистики по метеорологическим параметрам, характеризующим район расположения золоторудного месторождения, и полученным результатам математического моделирования следует, что для исследуемого района характерны максимально высокие (положительные) значения температурного градиента с октября по ноябрь, а максимально низкие (отрицательные) значения температурного градиента с марта по июнь и именно в этот период рекомендуется разработка дополнительных инженерно-технических мероприятий направленных на нормализацию параметров карьерного воздуха [39].

#### 4.6 Выводы по Главе 4

1. Математическое моделирование на базе современного программного комплекса Ansys Fluent включает в себя пять этапов, состоящих из создания аэродинамической модели для исследования, далее формирование сетчатых элементов и постановка граничных условий, после чего выполняется решение на основе контроля уровня невязок. В результате, метод математического моделирования аэродинамических процессов позволяет с высокой точностью осуществить оценку аэродинамических условий с учетом влияния различных характеристик воздушной среды в карьерном пространстве.

2. Из верификации аэродинамической модели карьерного пространства, на основе сравнения результатов натурного исследования и результатов математического моделирования, следует, что среднее отклонение между натурными и промоделированными значениями составляет 4,5%, что соответствует пределу погрешности в +/- 10%.

3. Формирующиеся в процессе разработки месторождения зоны рециркуляционного движения воздушных масс в карьере подвержены накоплению загрязняющих и отравляющих примесей, образующихся при выполнении ряда технологических операций в карьере. Исходя из результатов математического моделирования установлено, что через 47 минут после начала действия источника вредностей значение концентрации угарного газа начинает превышать предельно допустимое значение равное  $20 \text{ мг/м}^3$ . Для нормализации параметров рудничной атмосферы требуется выработка корректирующих мероприятий и контроль точного соблюдения технологического регламента производства.

4. На формирование атмосферы золоторудных карьеров оказывает влияние совместные действие орографических, метеорологических и технологических факторов. Если на первых стадиях разработки золоторудных месторождений проветривание карьеров может быть

осуществлено за счет естественных воздушных потоков, образуемых за счет ветрового напора, то при углублении горных работ начинается развитие зон рециркуляционного движения, в которых накапливаются загрязняющие вещества, что снижает эффективность естественной вентиляции. Для первого и второго этапа разработки месторождения движение воздушных масс в большей части карьера будет осуществляться по прямоточной схеме, что обеспечивает вынос загрязняющих веществ за пределы карьерного пространства на основе естественной вентиляции. При повышении глубины горных работ более, чем на 260 м, что характеризует третий этап разработки месторождения, для нормализации параметров карьерного воздуха необходимо использование дополнительных инженерно-технических мероприятий, которые характеризуют комплексный метод, сочетающий естественное проветривание и принудительную подачу воздуха по системе каналов в зоны рециркуляции и застойные зоны.

5. Температурная стратификация формируется на каждом этапе разработки месторождения. Исследуемый район Крайнего Севера характеризуется более частой отрицательной разностью температур, что приводит к большому выхолаживанию приземных слоев воздуха, так как поток тепла чаще направлен от воздуха к почве. Конечным результатом такого процесса может быть скопление охлажденных масс воздуха в нижней части карьера с соответствующим снижением интенсивности воздухообмена. Условие снижения скорости ветрового потока на поверхности при одновременном наличии инверсий приводит к нарушению воздухообмена и накоплению примесей в атмосфере карьера. Также установлено, что наиболее сложными условиями обеспечения аэрологической безопасности являются периоды, характеризующиеся образованием инверсии с отрицательным температурным градиентом. Классификация типов инверсий внутрикарьерном пространстве с учётом условий формирования температурной стратификации, позволят вести процесс выемки полезного ископаемого с точки зрения перспективы направленной на предупреждение проблем, связанных с аэродинамическими условиями на разрабатываемых горизонтах. Такой подход позволит повысить эффективность разработки месторождения на каждом из этапов развития за счет сокращения внеплановых простоев после проведения ряда технологических операций.

## **ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАТИВНЫХ УСЛОВИЙ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ В КАРЬЕРЕ**

### **5.1 Оценка влияния скорости и направления движения воздушного потока на эффективность естественного проветривания в карьере золоторудного месторождения**

При разработке полезного ископаемого большую роль играют метеорологические параметры района расположения месторождения. На изменение аэрологических условий в карьере оказывают влияние температура наружного воздуха, среды сформировавшейся в карьере и в приземном слое атмосферы, а также не меньшее влияние оказывает скорость движения воздушного потока и его направление [140,141]. В результате постоянного изменения аэродинамических условий, аэрологическая обстановка в карьере может ухудшиться и привести к образованию застойных зон и зон рециркуляционного движения воздушных масс, потенциально опасных для накопления загрязняющих и вредных примесей. Поэтому прогноз вероятности образования зон рециркуляции с учетом влияния метеорологических параметров атмосферного воздуха позволит определить рациональный период для ведения добычных работ, при которых генерируется значительное количество загрязняющих веществ, и, тем самым, исключить экономические потери и незапланированные простои в карьере [142,143].

Перед заданием граничных условий и выполнением математического моделирования, был осуществлён анализ данных, характеризующих метеорологические условия района расположения золоторудного месторождения. Обработка данных осуществлялась на основе программного комплекса Minitab, набор инструментов которого был использован как для первичной обработки данных метеорологических наблюдений, так и для их последующей интерпретации. В результате анализа статистических данных, характеризующих средние значения температуры атмосферного воздуха за последние 5 лет, было установлено, что среднемесячный интервал температур наружного воздуха в течение года находится в пределах  $\pm 15^{\circ}\text{C}$  (258,15 K/288,15 K). Результат анализа представлен на рисунке 5.1.



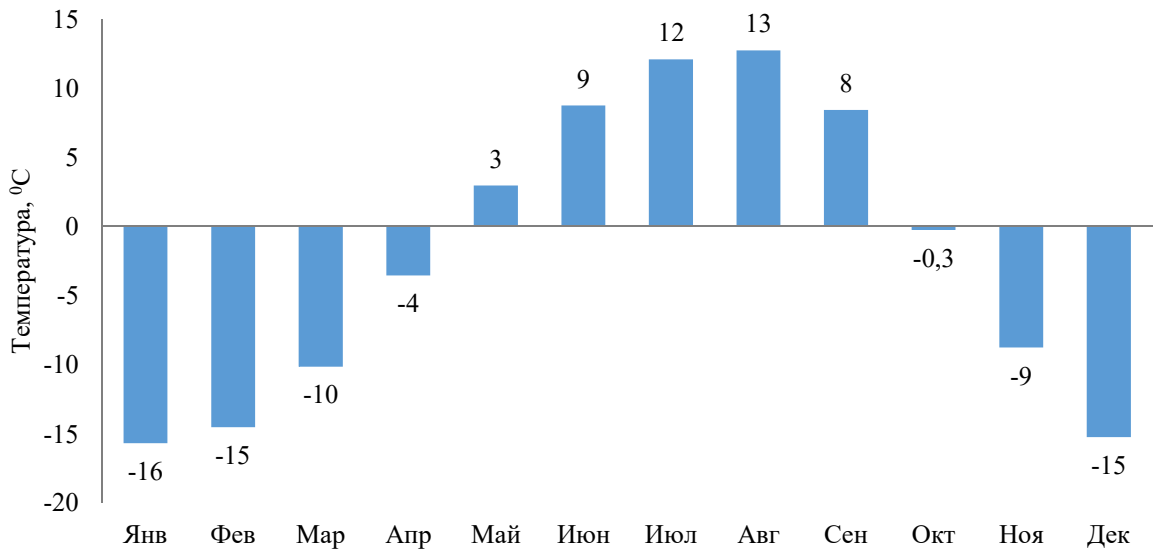


Рисунок 5.1 - Динамика изменения среднего значения температуры воздушной среды в районе расположения месторождения

Аналогичный анализ среднесуточных температур были выполнен для каждого из рассматриваемых месяцев. Результат представлен на рисунке 5.2. Из них следует, что относительно среднемесячного значения отклонение среднесуточной температуры составляет  $\pm 9^{\circ}\text{C}$  (264,15 K/282,15 K).

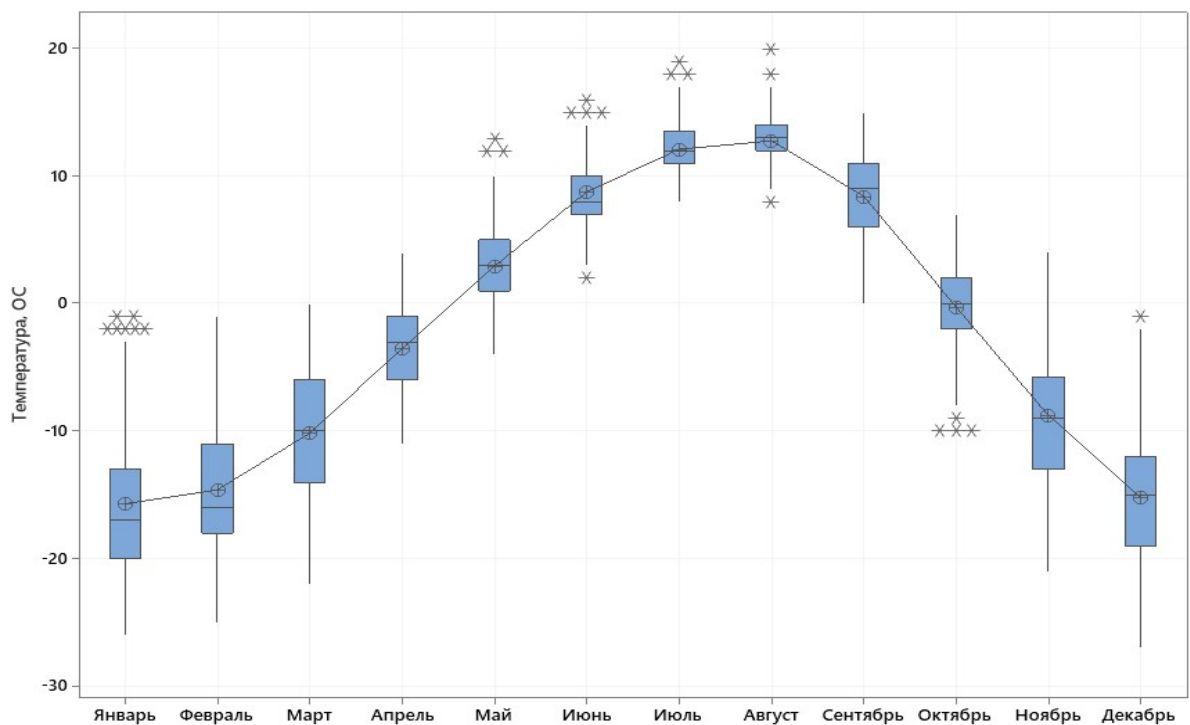


Рисунок 5.2 - Разброс значений среднесуточной температуры воздуха относительно среднемесячного значения

Таким образом, температура наружного воздуха в районе месторождения постоянно изменяется как в течение месяца, так и в течение суток, оказывая значительное влияние на аэродинамическую обстановку в карьере.

В результате интерпретации статистических данных было установлено, что среднегодовая температура воздуха в объёме карьерного пространства может быть принята соответствующей среднегодовой температуре наружного воздуха равной  $-2^{\circ}\text{C}$  ( $271,15\text{ K}$ ). Расчётная температура набегающего на карьерное пространство ветрового потока должна выбираться с учётом вероятности достижения среднесуточных температур атмосферного воздуха в диапазоне их изменения от  $0^{\circ}\text{C}$  ( $273,15\text{ K}$ ) до  $-27^{\circ}\text{C}$  ( $246,15\text{ K}$ ).

Из графика на рисунке 5.3 следует, что с максимальной вероятностью 24% температура атмосферного воздуха будет равна  $-15^{\circ}\text{C}$  ( $258,15\text{ K}$ ).

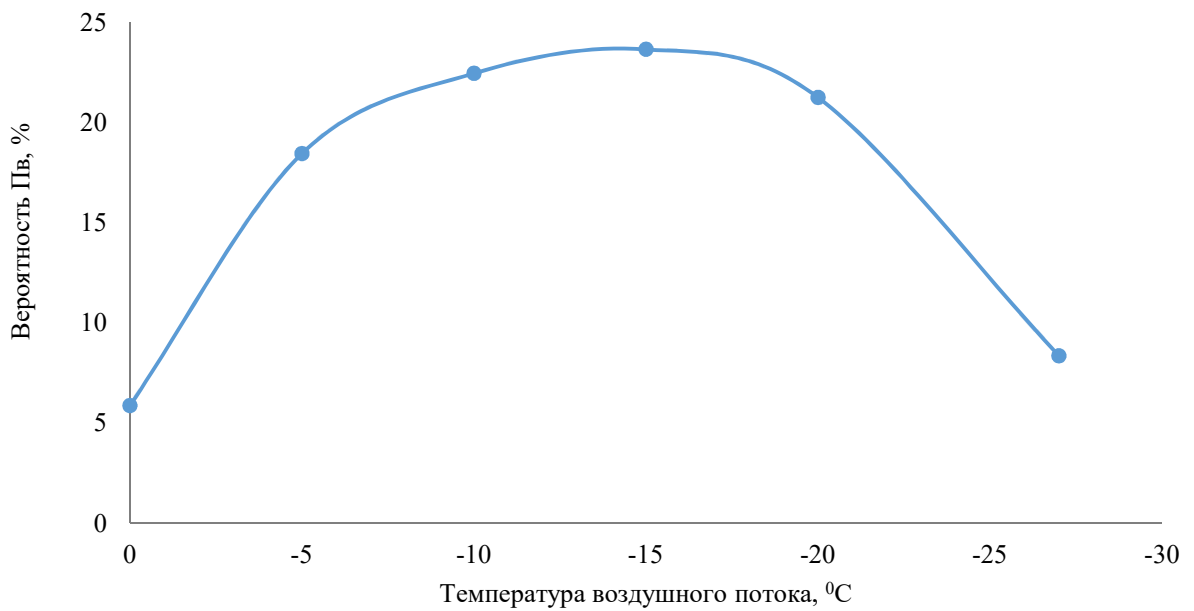


Рисунок 5.3 - Вероятность достижения значения температуры воздушной среды в районе расположения месторождения

Анализ среднестатистических данных по направлению движения воздушного потока показал, что вероятность возникновения ветрового потока северного, восточного и западного направления составляет 23%, 46% и 27% соответственно. Результат представлен на рисунке 5.4. При этом вероятность появления ветрового потока, движущегося в южном направлении, достаточно мала, что даёт основание для исключения данного направления из дальнейшего рассмотрения.

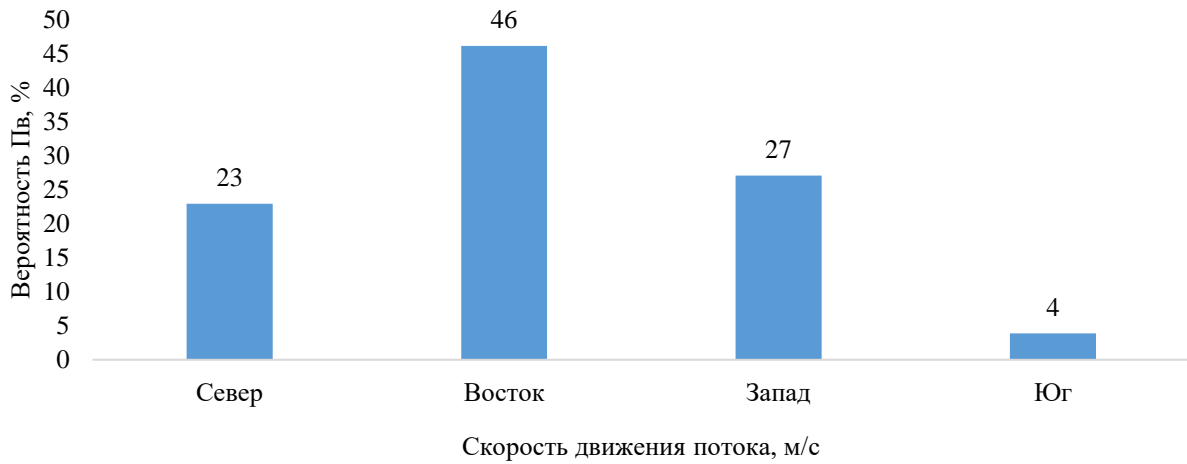


Рисунок 5.4 - Вероятность движения воздушного потока в соответствующем направлении в районе расположения месторождения

Анализ скоростей ветрового потока для каждого из направлений (север, запад, восток) показал, что значения изменяются в диапазоне 1 м/с – 10 м/с. Вероятность достижения соответствующей скорости для каждого из рассматриваемых направлений представлена на рисунке 5.5. Из линейного графика следует, что для каждого рассматриваемого направления максимальная доля вероятности, изменяющаяся в диапазон от 24% до 27%, приходится на скорость движения воздушного потока равную 3 м/с.

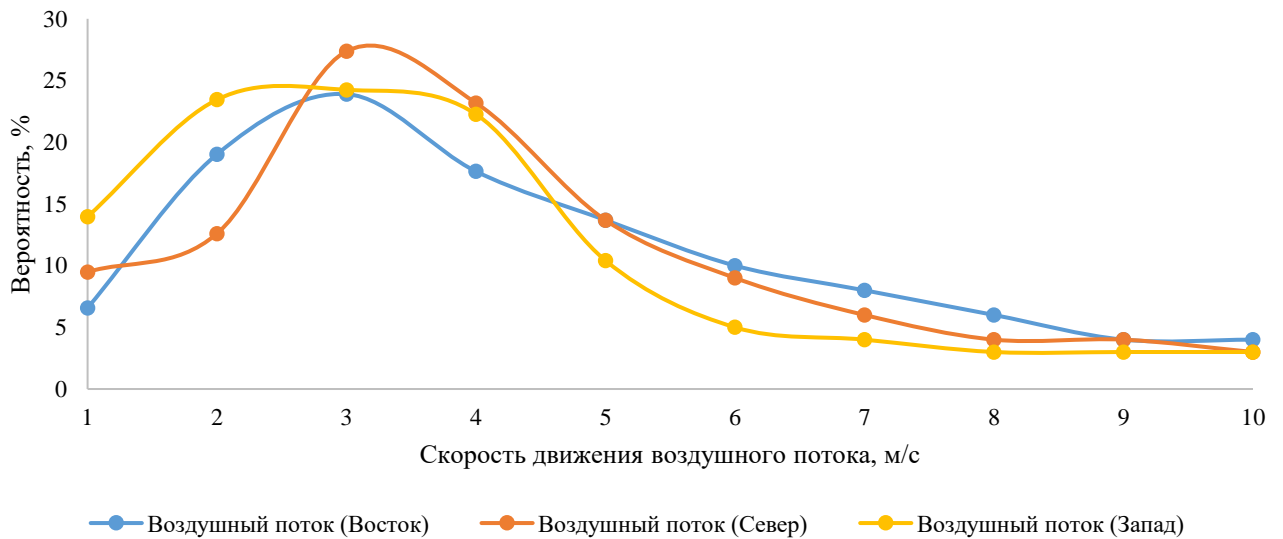


Рисунок 5.5 - Вероятность достижения скорости движения воздушного потока по соответствующему направлению в районе расположения месторождения

Перед проведением математического моделирования были заданы следующие начальные и граничные условия:

*Воздушный поток, поступающий в карьер извне:*

Давление приравнено к атмосферному и составляет 0,1 МПа. Направление движения, скорость и температура соответствует значениям таблицы 5.1.

*Воздушная среда, сформировавшаяся в карьере:*

Сформировавшаяся воздушная среда внутрикарьерном пространстве находится в стационарном состоянии, а давление соответствует атмосферному давлению.

Плотность двух рассматриваемых сред вследствие постоянства их температур принята неизменным.

С целью определения степени влияния скорости и направления воздушного потока на условие формирования аэродинамических процессов в карьере, максимальные значения скорости были декомпозированы относительно среднестатистического значения по году, равного 3 м/с. Значения исходных данных для моделирования приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Граничные условия для проведения моделирования

<b>Направление движения потока</b>	<b>Скорость движения, м/с</b>	<b>Температура среды за границами карьера, К</b>	<b>Температура среды внутри границ карьера, К</b>
Восток	1	258,15	271,15
Восток	3	258,15	271,15
Восток	5	258,15	271,15
Восток	8	258,15	271,15
Восток	10	258,15	271,15
Запад	1	258,15	271,15
Запад	3	258,15	271,15
Запад	5	258,15	271,15
Запад	8	258,15	271,15
Запад	10	258,15	271,15
Север	1	258,15	271,15
Север	3	258,15	271,15
Север	5	258,15	271,15
Север	8	258,15	271,15
Север	10	258,15	271,15

В результате математического моделирования было установлено, что изменение скорости и направления движения воздушного потока на Земной поверхности при постоянной температуре приводит к возникновению в карьере различных аэрологических ситуаций.

Так, например, при движении воздушного потока по направлению простирания рудного тела (движение воздушного потока с восточного направления) со скоростью 1 м/с объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс в карьерном пространстве минимален, при этом застойные зоны, в основном, сосредоточены в донной части карьера и со стороны подветренного борта. Результат представлен на рисунке 5.6. При движении воздушный поток омывает практически всю поверхность карьера. Вследствие этого, скорость воздуха вблизи поверхности рабочих уступов снижается не значительно.

На формирование скоростного поля, кроме геометрии карьера, оказывает влияние температурный градиент. В процессе конвективного теплообмена между двумя средами, температура потока воздуха, пересекающего карьерное пространство, повышается по сравнению с температурой воздуха, заполняющего карьерное пространство.

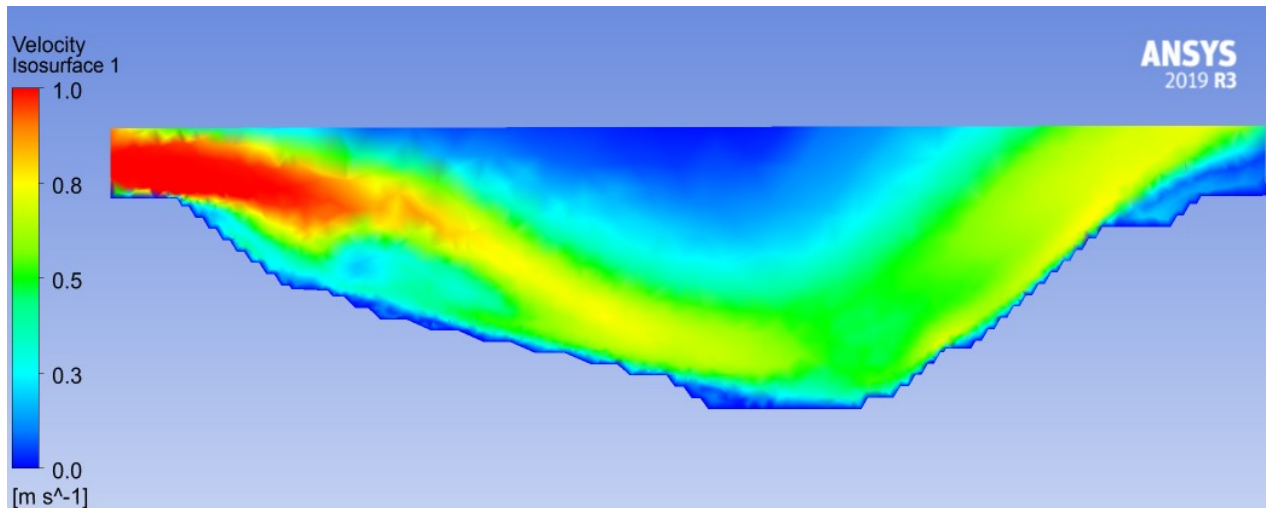


Рисунок 5.6 - Скоростное поле при движении потока по простиранию рудного тела со скоростью 1 м/с. Результат соответствует условию 1 из таблицы 5.1.

С ростом температуры значение плотности снижается, а скорость движения потока возрастает, что приводит к развитию восходящих потоков, способствующих перемещению воздушных масс в карьере.

В процессе последующего моделирования установлено, что с увеличением скорости движения воздушного потока по Земной поверхности аэрологическая обстановка на рабочих местах в карьере ухудшается. Результат представлен на рисунке 5.7. Эффективность естественной вентиляции снижается вследствие уменьшения площади контакта ветрового потока с поверхностью карьера, в результате чего, объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс в донной части карьера и со стороны подветренного борта увеличивается в несколько раз по сравнению с предыдущей аэрологической обстановкой. Вследствие этого, скорость воздуха вблизи поверхности рабочих уступов значительно снижается и в результате чего образуются застойные зоны потенциально опасные для накопления загрязняющих и вредных примесей.

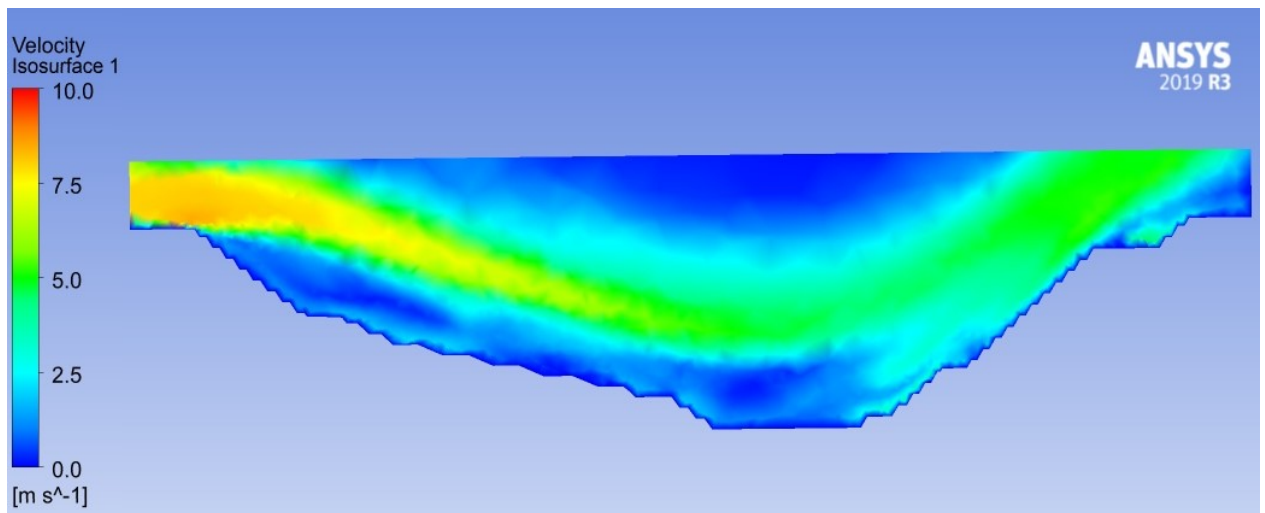


Рисунок 5.7 - Скоростное поле при движении потока по простиранию рудного тела со скоростью 10 м/с. Результат соответствует условию 5 из таблицы 5.1.

Для определения возможностей естественной вентиляции при различных метеорологических условиях в сечении с подветренной стороны карьера на расстоянии 500 метров от верхней границы формирования карьерного пространства был детализирован характер распределения скорости воздушного потока по глубине карьера. Результат представлен на рисунке 5.8. Выбор данного сечения был осуществлен на основании анализа результатов математического моделирования, согласно которым, наибольший процент образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс от общего объема выработанного пространства приходится именно на эту область. Расчеты значений скорости движения воздушного потока внутри границ карьерного пространства были проведены в точках на расстоянии 50 метров друг от друга. Исходя из полученных данных, была построена графическая зависимость скорости воздушного потока от глубины карьера. Результат представлен на рисунке 5.9.

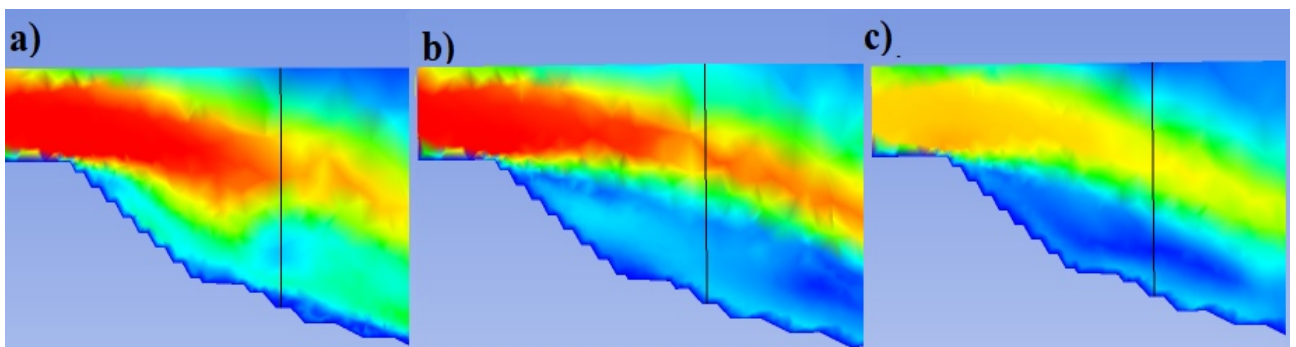


Рисунок 5.8 - Выполненное сечение с подветренной стороны карьера для аэродинамических картин с заданными метеорологическими условиями для воздушного потока, движущегося по Земной поверхности: а) начальная скорость 1 м/с; б) начальная скорость 5 м/с; в) начальная скорость 10 м/с

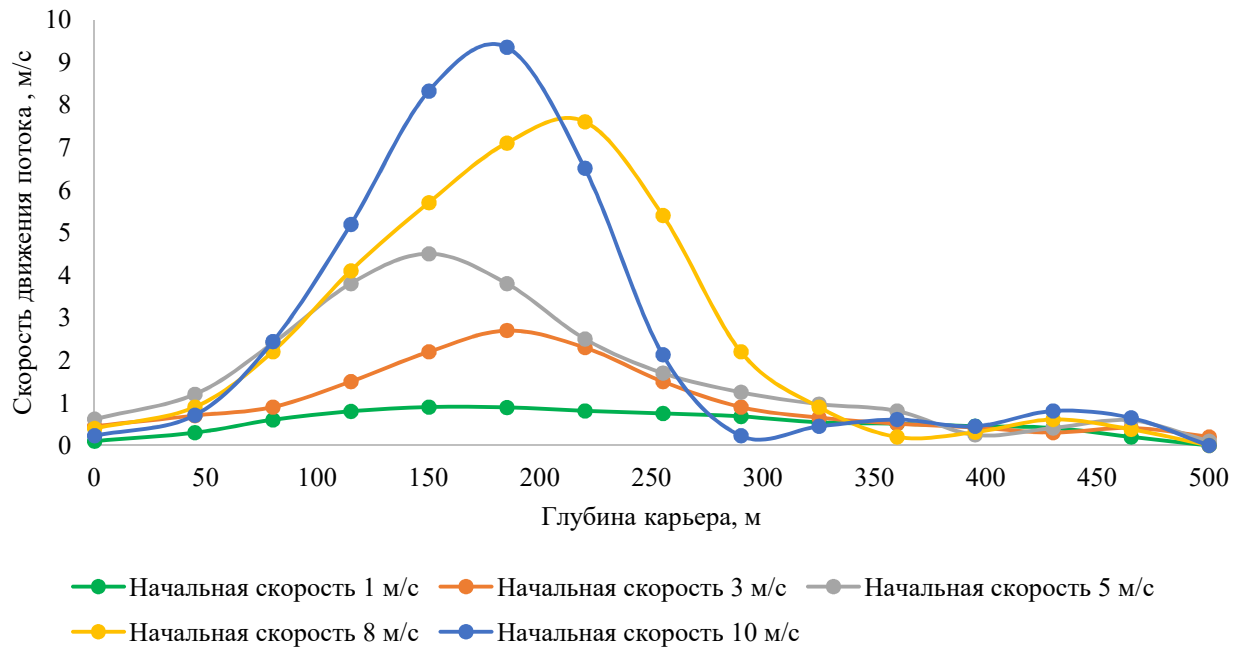


Рисунок 5.9 - Величина изменения скорости воздушного потока с глубиной карьера

Из графика на рисунке 5.9 следует, что с увеличением начальной скорости движения воздушного потока по Земной поверхности с 1 до 10 м/с эффективность естественной вентиляции снижается, так как глубина, на которой обеспечивается полноценный вынос всего объема загрязняющих веществ за границы карьерного пространства, изменяется в диапазоне от 150 до 230 метров. Основываясь на полученных ранее зависимостях, представленных на рисунке 5.4 и 5.5, можно утверждать, что в сравнении с другими вариантами чаще всего формируется воздушный поток, движущийся в восточном направлении со скоростью 3 м/с.

Таким образом, в среднем до глубины карьера в 185 метров, аэрологическая безопасность, как подветренного борта карьера, так и всего выработанного пространства, будет обеспечиваться за счет движения воздушных масс, формирующихся под действием естественных ветровых потоков. С увеличением глубины эффективность естественной вентиляции начинает значительно снижаться. Об этом свидетельствуют значения скорости воздушного потока, которые достигнув максимума, начинают уменьшаться вплоть до уровня донной части карьера. Также следует отметить, что для всех рассмотренных метеорологических условий характерно незначительное увеличение скорости воздушного потока примерно на глубине в 425 метров. Данный результат является следствием образования зоны рециркуляционного движения воздушных масс. В результате у поверхности рабочих уступов карьера образуются застойные зоны, в которых скорость движения не превышает 0,3 м/с.

Для повышения эффективности ведения горных работ, обеспечения безопасности на рабочих местах, а также исключения незапланированных простоев горнотранспортного оборудования, необходимо планировать горные работы на основе прогноза аэрологической

ситуации в карьере. Примером такого прогноза может служить полученная на основе результатов математического моделирования экспоненциальная зависимость образования объема застойных зон от скорости движения воздушного потока внутрикарьерном пространстве. В данную зависимость также включен результат дополнительного расчета вероятности возникновения соответствующих аэрологических условий, который основан на произведении вероятности движения воздушного потока в соответствующем направлении и его вероятности движения с соответствующей скоростью.

Из представленной на рисунке 5.10 зависимости следует, что с увеличением скорости движения воздушного потока, пересекающего карьерное пространство, аэрологическая ситуация усугубляется, так как объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс возрастает от 1 до 40% от общего выработанного пространства. При этом на наиболее сложные аэрологические условия, при которых образуется значительный объем застойных зон на уровне 30-40% от общего выработанного пространства, приходится малая доля вероятности и составляет всего 1%. Наиболее часто, с вероятностью в 11%, воздушный поток движется в восточном направлении со скоростью 3 м/с, что приводит к образованию застойных зон в карьере объем которых равен 12% от общего выработанного пространства. Учитывая необходимость обеспечения непрерывного режима работы предприятия, существует 11-процентная вероятность возникновения неблагоприятной для ведения работ аэрологической ситуации, что может привести к снижению производительности труда и незапланированным простоям горнотранспортного оборудования в течение 1,5 месячного периода, что скажется на увеличении себестоимости конечного продукта.

Одним из временных превентивных мероприятий по минимизации незапланированных простоев техники может быть распределение оборудования, задействованного на добычных работах, с подветренного борта карьера на наветренный борт до момента возникновения условий, способствующих разрушению зон рециркуляции, прилегающих к рабочим горизонтам подветренной части карьера. Однако, данное мероприятие позволяет бороться со следствием, но при этом никак не воздействует на саму причину возникновения застойных зон. Для обеспечения постоянной аэрологической безопасности во всем выработанном пространстве карьера необходима разработка дополнительных инженерно-технических мероприятий.



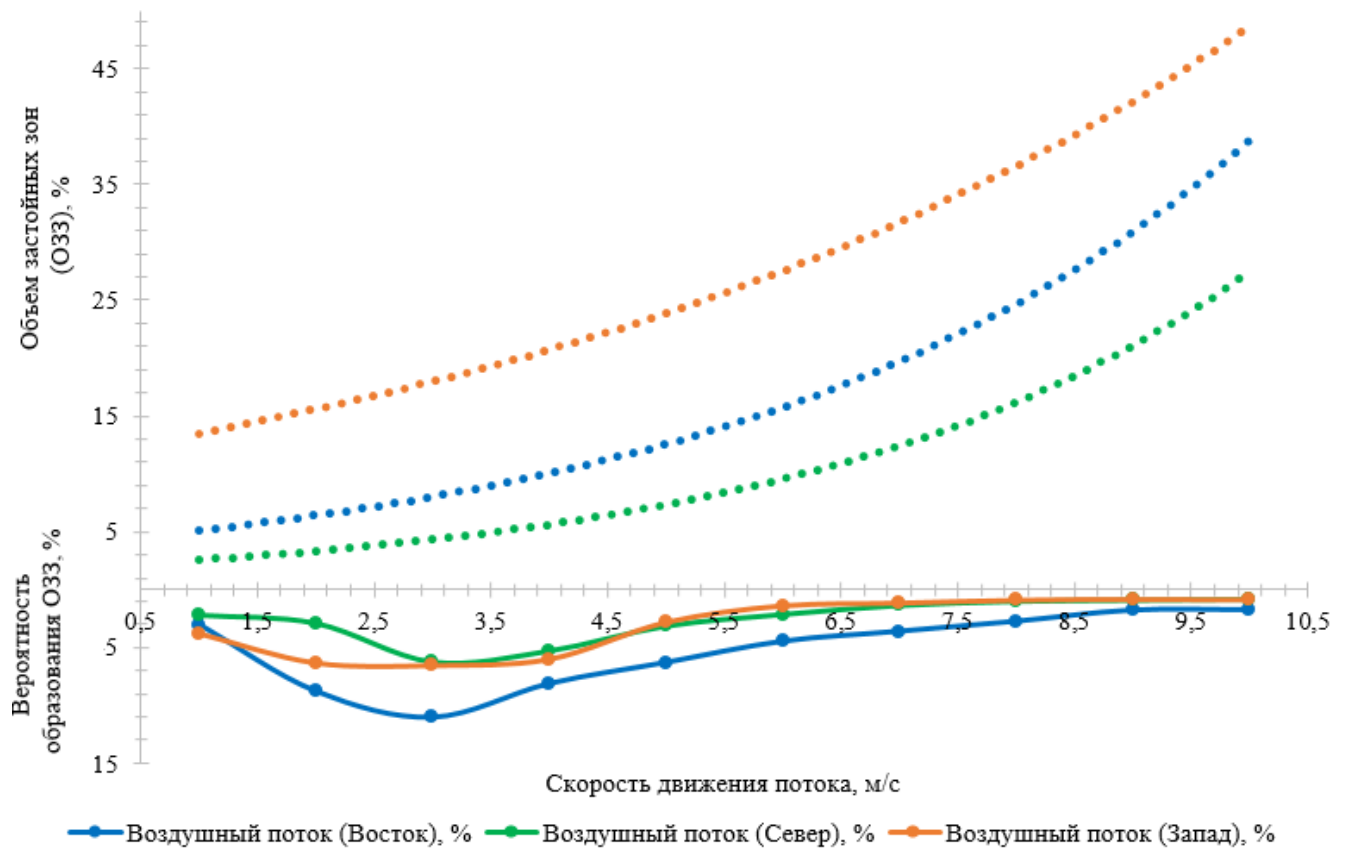


Рисунок 5.10 - Объем застойных зон, образующейся в карьерном пространстве, в зависимости от скорости ветрового потока, вероятность равенства которой, определяется направлением ветрового потока и вероятности соответствующих аэрологических условий при движении воздуха с определенной скоростью и направлением

## 5.2 Применение подземных горных выработок для повышения эффективности естественной вентиляции в карьере

С развитием месторождения конфигурация карьерного пространства постоянно изменяется, в том числе увеличивается и глубина ведения добычных работ. С увеличением глубины, вероятность образования застойных зон возрастает, поэтому согласно проектной документации месторождения, для нормализации параметров рудничной атмосферы после проведения ряда технологических операций, связанных с выбросом загрязняющих веществ, предполагается применение подземных горных выработок, пройденных на определенных обрабатываемых горизонтах [154]. Целью данных выработок является не только подача свежей струи в застойные зоны, но и применение их для доставки горнорудной массы на поверхность с рабочего горизонта. Поэтому расположение подземных горных выработок должно определяться не только с учетом сокращения расстояния доставки отбитой руды, но и с возможностью эффективной вентиляции выработанного пространства [33,157].

Таким образом, перед определением места расположения выработок необходимо проведение математического моделирования аэродинамических процессов с установлением участков карьерного пространства, где наиболее вероятно образование зон рециркуляции или застойных зон. На рисунке 5.11 представлено типовое проектное решение по размещению таких выработок в карьере.

На каждом из противоположенных бортов карьера проходятся по одному наклонному стволу, предназначенных для вскрытия проектных горизонтов и дренажа подземных вод. Параметры проходки наклонных стволов обеспечивают доступ в карьер на различных отработываемых горизонтах посредством использования 20 коротких штолен. Сечения выработок не превышает  $6 \text{ м}^2$ . Пройденные горные выработки представляют собой комплекс конвейерных, дренажных и вентиляционных выработок, объединенные в единую транспортную сеть.



Рисунок 5.11 - Один из вариантов размещения горных выработок на бортах карьера

Перед выполнением математического моделирования процесса естественной вентиляции было принято, что движение воздушных масс происходит в направлении простирания рудной залежи, а именно вдоль оси  $Y$  со средней скоростью  $5 \text{ м/с}$ . Таким образом, первый воздушный поток формируется за счет естественных сил и движется вдоль карьерного пространства, второй же поток свежей струи воздуха нагнетается с поверхности карьера и посредством подземных горных выработок осуществляет вентиляцию труднодоступных мест выработанного пространства. С северной и южной стороны для вентиляции задействовано по 10 штолен. Выработки представлены на рисунке 5.12. Параметры для моделирования были заданы следующие: температура воздуха равна  $248 \text{ К}$ , давление  $0,1 \text{ МПа}$ , плотность воздуха  $1,2 \text{ кг/м}^3$ .

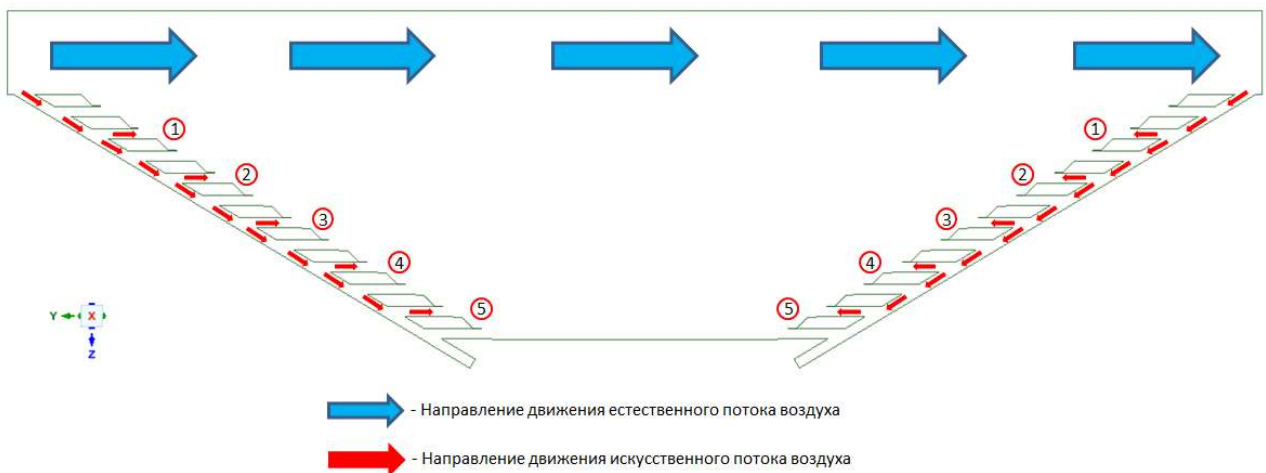


Рисунок 5.12 - Схема движения воздушных потоков в карьерном пространстве.

В результате было установлено, что образование зон рециркуляции характерно для третьей стадии разработки, причем ее максимальный объем, приурочен к завершающему периоду разработки. Объем зоны рециркуляции составил 30% от общего объема карьерного пространства. Результат представлен на рисунке 5.13.

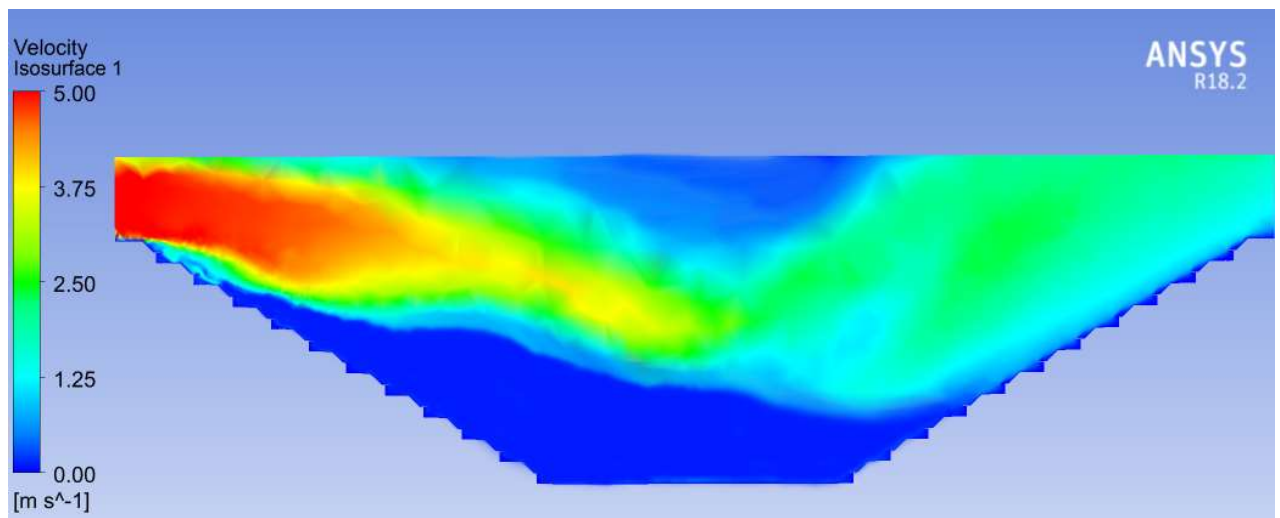


Рисунок 5.13 - Распределение скоростей воздушного потока в карьерном пространстве при естественной вентиляции на момент завершения разработки месторождения

При использовании для проветривания карьера принудительной вентиляции осуществляемой путем подачи воздуха с общим расходом  $60 \text{ м}^3/\text{сек}$  с начальной скоростью  $2 \text{ м/с}$  по 5 выработкам (штольни), имеющим выход в карьерное пространство, конфигурация поля скоростей в карьерном пространстве значительно изменяется. Результат представлен на рисунке 5.14.

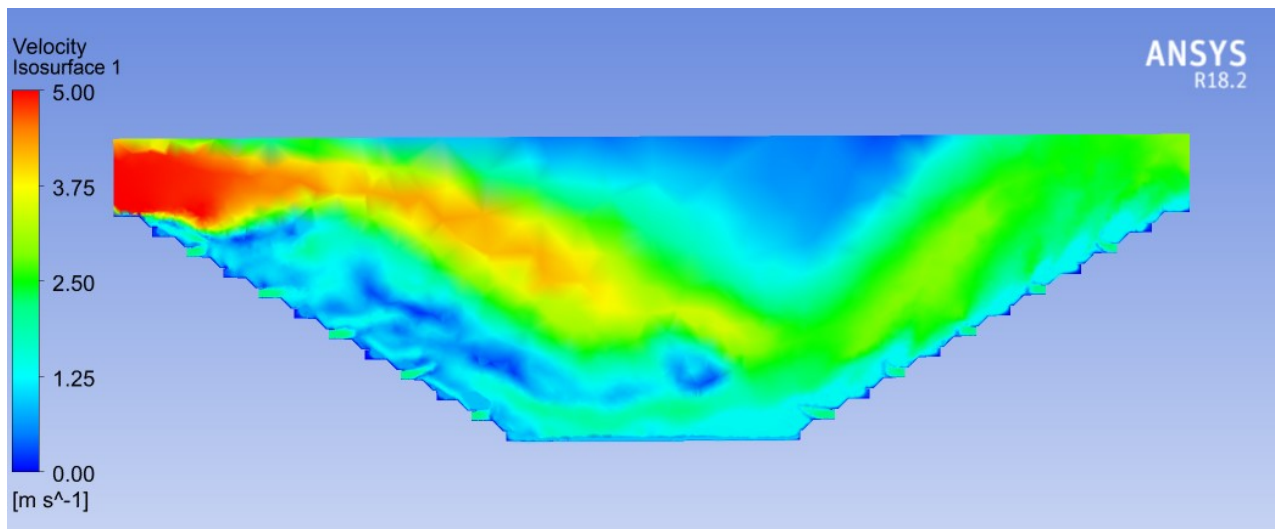


Рисунок 5.14 - Распределение скоростей воздушного потока в карьерном пространстве при совместной естественной и принудительной вентиляции на момент завершения разработки месторождения

В результате взаимодействия двух воздушных потоков, вызванных движением воздуха за счет естественных факторов и принудительной вентиляцией через систему выработок, объем зон рециркуляции в карьере значительно сокращается, а средняя скорость воздушного потока устанавливается на уровне 2,0 м/с.

Это дает основание говорить об эффективности предлагаемого способа вентиляции карьера.

### 5.3 Комбинированное применение гибких трубопроводов и подземных горных выработок для интенсификации естественной вентиляции в карьере

Существуют различные методы естественной и искусственной вентиляции карьерного пространства. После достижения глубины курьера до величины, при которой естественная вентиляция уже не обеспечивает распределения температур по глубине с положительным градиентом, для которого характерен самопроизвольный вынос загрязняющих веществ за пределы карьерного пространства [155,156], начинают разрабатываться мероприятия по интенсификации естественной вентиляции. Глубина карьера, где не обеспечивается вентиляция с помощью естественных сил, характеризуется образованием областей с отрицательным температурным градиентом вследствие резкого изменения температуры атмосферного воздуха в течение недельного или суточного периода. В образующихся областях происходит рециркуляция воздуха, приводящая к накоплению загрязняющих веществ. Для того чтобы разрушить области с отрицательной температурной инверсией в неё осуществляют принудительную подачу атмосферного воздуха с температурой, превышающей температуру,

сформировавшуюся ранее при поступлении более холодного воздуха. Результатом этого является превентивное предупреждение накопления загрязняющих веществ. Для организации принудительной подачи воздуха возможно применение комбинированного метода посредством подземных горных выработок и гибких трубопроводов, расположенных внутрикарьерном пространстве. Принципиальная схема предлагаемого метода представлена на рисунке 5.15 [40].

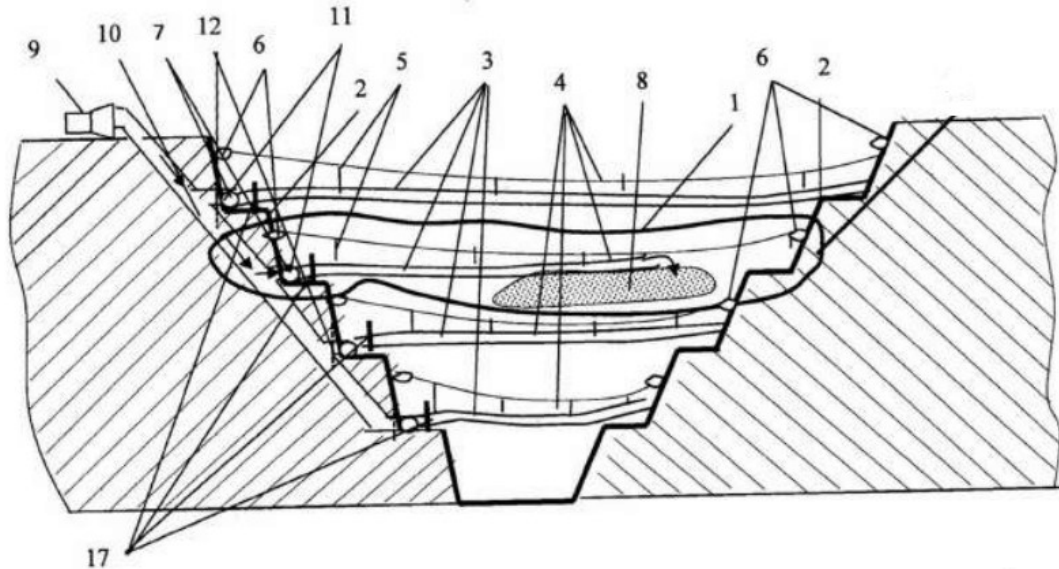


Рисунок 5.15 - Вертикальный разрез карьера с трубопроводами для подачи воздуха, где:  
 1 – карьерное пространство; 2 – карьерные уступы; 3 – гибкие трубопроводы; 4 – тросы; 5 – подвижные подвески; 6 – устройства для крепления тросов и перемещения гибких воздухопроводов в горизонтальных плоскостях; 7 – трубопроводы для распределения воздуха; 8 – область с отрицательной температурной инверсией; 9 – вентилятор; 10 – наклонный ствол; 11 – сбойки; 12 – перемычки в сбояках; 13 – канаты для перемещения гибких воздухопроводов; 14 – лебёдки; 15 – молниевое соединение; 16 – патрубок; 17 – шиберы на гибких трубопроводах

Для организации данного метода на одном из нерабочих бортов карьера проходят наклонный ствол 10, который соединяют с карьерным пространством сбояками 11, выходящими на сопряжение откосов и рабочих площадок карьерных уступов 2. По образующей сопряжения откосов и рабочих площадок карьерных уступов 2 устанавливают трубопроводы для распределения воздуха 7, к которым с помощью патрубка 16 присоединяют гибкие трубопроводы 3. Гибкие трубопроводы 3 подвешиваются на подвижных подвесках 5 к тросам 4, которые укрепляются на откосах карьерных уступов 2 с помощью устройств для крепления тросов и перемещения гибких воздухопроводов в горизонтальных плоскостях 6 и связывают противоположенные нерабочие борта карьера в горизонтальных плоскостях по глубине карьера. Подача атмосферного воздуха в гибкие трубопроводы 3 осуществляют вентилятором 9, установленным на поверхности на удалении не менее чем в 20 м от устья наклонного ствола 10, и далее по наклонному стволу 10, сбоякам 11 и трубопроводу 7. Для регулирования

распределения воздуха между сбойками и гибкими трубопроводами используют перемычки в сбойках 12 и шиберы на гибких трубопроводах 17.

Положение перемычек 12 в сбойках определяется глубиной карьера, где образовалась зона отрицательной температурной инверсии. В тех сбойках по глубине карьера, которые связывают наклонный ствол с карьерным пространством, где расположена зона отрицательной температурной инверсии, перемычки, находятся в положении «открыто», а в остальных сбойках в положении «закрыто». В свою очередь, положение шиберов 17 на гибких трубопроводах 3 определяется местом расположения зоны с отрицательной температурой инверсией 8 в горизонтальных плоскостях карьера. На тех гибких трубопроводах 3, которые выходят в зону отрицательной температурой инверсией 8, шибера приводятся в положение «открыто», а в остальных гибких трубопроводах 3 в положении «закрыто».

Необходимую длину гибких трубопроводов 3 и количество в одновременной работе определяют по месту расположения области с отрицательной температурной инверсией 8. Для этого гибкие трубопроводы 3 от места их соединения с трубопроводом для распределения воздуха 7 до области с отрицательной температурной инверсией 8 собирают из отдельных частей, которые прикрепляют друг к другу с помощью молниевых соединений 15 и наращивают до достижения расположения его выхода в зоне отрицательной температурной инверсии 8. Перемещение гибких трубопроводов 3 по тросам 4 осуществляют канатами, прикреплённого к их концам, с помощью устройств для крепления тросов и перемещения гибких воздухопроводов в горизонтальных плоскостях 6, через которые пропускаются канаты для перемещения гибких воздухопроводов 13, и лебёдок 14, которые устанавливают на противоположенных бортах карьера в плоскости расположения гибких трубопроводов.

Работоспособность предлагаемого способа подтверждена результатами математического моделирования аэротермодинамических процессов при естественном способе проветривания и сочетании естественного и принудительного способов проветривания. Для этого рассмотрен карьер глубиной 700 метров, длиной по простиранию по поверхности – 1400 метров, вкrest простирания по поверхности – 700 метров, длина по простиранию по дну – 300 метров, вкrest простирания по дну – 175 метров, углы откоса по лежащему и висячему борту – 55 градусов. При моделировании естественной вентиляции было принято, что движение воздушных масс происходит в направлении простирания рудной залежи, а именно вдоль оси Y со средней скоростью 5 м/с. Температура воздуха равна 248 К, давление 0,1 МПа, плотностью воздуха 1,2 кг/м<sup>3</sup>.

Результат математического моделирования представлен на рисунке 5.16. Из него следует, что при естественном проветривании образуется зона с отрицательной инверсией

(показана синим цветом), в которой происходит рециркуляция карьерного воздуха и накопление загрязняющих веществ.

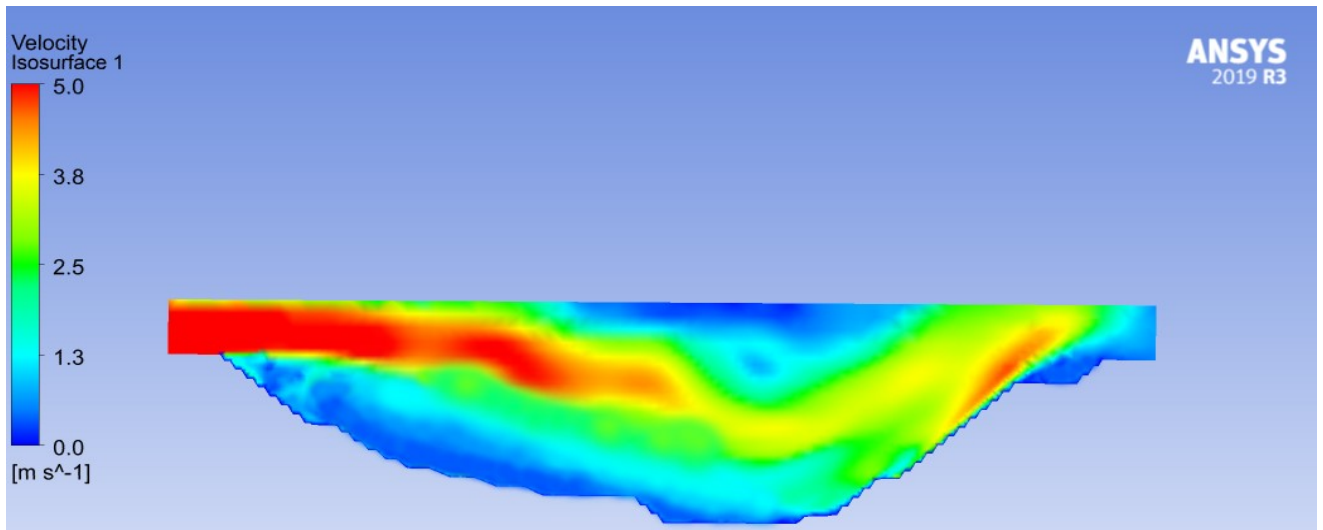


Рисунок 5.16 - Скоростное поле при движении потока по простиранию рудного тела со скоростью 5 м/с.

Для разрушения зоны с отрицательной температурной инверсией в неё по семи гибким воздуховодам, диаметром 0,5 м, расположенным по глубине и простиранию карьера, с помощью вентилятора осуществляется подача атмосферного воздуха с температурой, превышающей температуру воздуха, заполняющего эту зону. Общий расход воздуха составляет  $60 \text{ м}^3/\text{с}$ , а скорость воздуха на выходе из каждого гибкого воздуховода в карьерное 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 минимальных значений, а средняя скорость воздушного потока устанавливается на уровне 2,0 м/с. Результат представлен на рисунке 5.17.

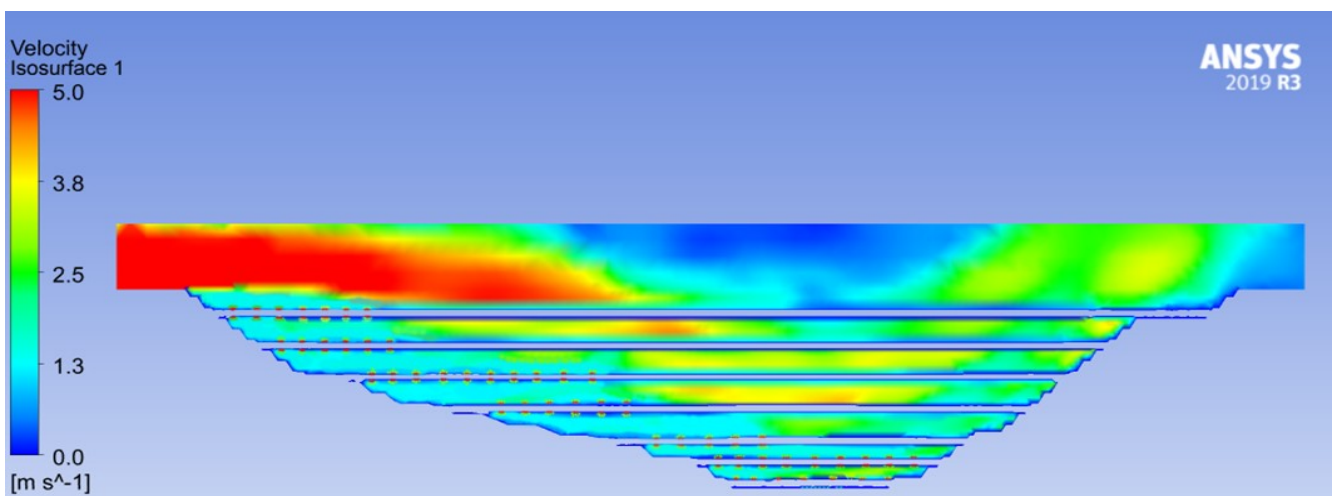


Рисунок 5.17 - Скоростное поле при условии совместного действия естественной и принудительной вентиляции в карьере

Использование предлагаемого способа проветривания, основанного на использовании подземных горных выработок и глубоких трубопроводов, 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.

#### 5.4 Выводы по Главе 5

1. Для исследуемых условий золоторудного месторождения с учетом вероятности формирования тех или иных метеорологических условий установлено, что в среднем до глубины карьера в 185 метров обеспечивается эффективное проветривание, как подветренного борта карьера, так и всего выработанного пространства воздушными массами, формирующимися за счет естественных ветровых потоков. При этом сравнение результатов математического моделирования показало, что вариативность значений скорости и направления движения воздушных потоков оказывает непосредственное влияние на эффективность естественной вентиляции внутрикарьерного пространства. В результате установлено, что 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, так как объем образующихся зон рециркуляционного движения воздушных масс относительно общего выработанного пространства возрастает. Также установлено, что наиболее сложными условиями обеспечения аэрологической безопасности являются периоды, характеризующиеся скоростью движения воздушного потока более 3 м/с, поэтому для нормализации параметров карьерного воздуха необходимо использование дополнительных инженерно-технических мероприятий и на постоянной основе производить прогнозирование аэрологических условий в зависимости от метеорологических условий района расположения месторождения, это, в свою очередь, позволит повысить эффективность разработки месторождения за счет более грамотного планирования горных работ и сокращения внеплановых простоев на каждом из этапов развития месторождения.

2. Для вентиляции глубоких золоторудных карьеров, расположенных в условиях сурового климата, необходимо применение комплексного 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 значительному сокращению объема зон рециркуляции. При этом



средняя скорость воздушного потока устанавливается на уровне 2,0 м/с, что способствует выносу из карьерного пространства загрязняющих веществ;

3. Использование принудительной вентиляции через систему гибких трубопроводов приводит к значительному сокращению объема зон рециркуляции за счет адресного воздействия на застойные зоны, что позволяет обеспечивать нормализацию параметров рудничной атмосферы после проведения ряда технологических операций в карьере.

## 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 трубопроводов, 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амосов П.В. Двухмерное численное моделирование аэротермодинамики атмосферы карьера / Амосов П.В., Новожилова Н.В. // Сб. докл. Всерос. науч. — техн. конф. с участием иностранных специалистов «Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли - формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов». 13-15 октября 2014 г., Апатиты; СПб.:«Реноме». - 2014. - Т. 1. - С. 153-159.
2. Амосов, П.В. Разработка компьютерной модели аэротермодинамики атмосферы карьера в Asys Fluent / П.В. Амосов, С.А. Козырев, О.В. Назарчук // Известия СПбГТИ(ТУ). - 2018. - №44. – С. 121-125. - DOI 10.15217/issn1998984-9.2018.44.121.
3. Амосов, П.В. Исследование влияния температурного градиента на формирование метеополей атмосферы карьера (на базе численного моделирования) / П.В. Амосов, Н.В. Новожилова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2015. - спец. вып. №56. – С. 528-534.
4. Амосов, П.В. Влияние пористости многолетнемерзлых горных пород на глубину оттаивания / П.В. Амосов, Н.В. Новожилова // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2014. - №2. – С. 59-66.
5. Амосов, П.В. Результаты численного моделирования аэродинамики тупиковых выработок при беструбном способе проветривания / П.В. Амосов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. - 2020. - №2. - С. 114-117.
6. Амосов, П.В. Определение доминирующего фактора в паре «взрывные работы – ветровой режим» методом численного моделирования / П.В. Амосов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. - 2020. - №3. - С. 123-126.
7. Амосов, П.В. Опыт создания компьютерной модели аэротермодинамики атмосферы карьера в ANSYS FLUENT / П.В. Амосов, С.А. Козырев, О.В. Назарчук // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. - 2018. - Т. 1. - С. 79-84.
8. Ахметов, М.С. Результаты аэрометеорологических исследований температурного и ветрового режима в Коркинском карьере / Ахметов М.С., Искварина З.К. // Сборник работ Свердловской ГМО. – 1970. – вып. 10. - С. 102-105.
9. Абдюшев, А.Я. Экспериментальные исследования турбулентных струй, развивающихся вблизи плоской поверхности / Абдюшев А.Я., Бахарев В.А., Фёдорова Л.В. // Труды Казанского инженерно-строительного института. – 1968. - вып. 7. - 174 с.
10. Абрамов, Ф.А. К вопросу о проветривании глубоких карьеров / Абрамов Ф.А. // Материалы межобластной научно-технической конференции по открытой разработке месторождений Украины. – 1957. – С. 20-22.

11. Бакланов, А.А. Оценка вертикального потока массы пыли на хвостохранилище на базе схемы «DEAD» / Амосов П.В., Бакланов А.А. // Проблемы недропользования. – 2015. - №3. - С. 80-84.
12. Бакланов, А.А. Прогноз загрязнения атмосферы при случайном выборе дискретных пылящих участков на базе численного моделирования / Бакланов А.А., Амосов П.В., Макаров Д.В., Маслобоев В.А. // «Известия вузов. Горный журнал». – 2021. - № 5. - С. 63-74. - DOI: 10.21440/0536-1028-2021-5-63-74.
13. Бакланов, А.А. Методический подход по оценке уровня пылевого загрязнения атмосферы на базе численного моделирования / Бакланов А.А., Амосов П.В. // Международное совещание «Плаксинские чтения–2020». – 2020. - С. 294-296.
14. Бакланов, А.А. Результаты оценки загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилища (на базе трехмерного моделирования) / Бакланов А.А., Амосов П.В., Маслобоев В.А. // «Известия вузов. Горный журнал». – 2017. - № 6. - С. 87-94.
15. Бакланов, А.А. Современные представления о вентиляции карьеров / Бакланов А.А., Луковский В.Д., Ритина О.Ю.; Апатиты: изд. КНЦ РАН, 1995. - 52 с.
16. Батулин В.В. Основы промышленной вентиляции / Батулин В.В.; Москва: Профиздат, 1990. - 448 с.
17. Бересневич, П.В. Аэрология карьеров / П.В. Бересневич, В.А. Михайлов, С.С. Филатов.; Москва: Недра, 1990. - 280 с.
18. Бахарев, В.А. К теории и расчету свободных турбулентных струй / Бахарев В.А. // Теория и расчет вентиляционных струй. – Ленинград, 1965. - С. 12-26.
19. Битколов, Н.З. Экспериментальная проверка и обоснование схемы искусственного проветривания карьеров производственного объединения Каратау / Битколов Н.З. и др. // Горный журнал. - 1976. - № 7. - С. 22-25.
20. Бакланов, А.А. Численное моделирование в рудничной аэрологии / Бакланов А.А.; Апатиты: изд. Кольского филиала АН СССР, 1987. - 200 с.
21. Бобровников, В.Н. Основные методы управления аэрогазопылединамическими процессами в рабочем пространстве карьеров и разрезов Крайнего Севера / В.Н. Бобровников, Е.Б. Гридина, К.Н. Ястребова // Сборник научных трудов. Выпуск 1 «Аэрология и безопасность горных предприятий». - Москва: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. - С. 59-63.
22. Битколов, Н.З. Аэрология карьеров / Битколов Н. З., Медведев И. И.; Москва: Недра, 1992. - 10 с.
23. Бакланов, А.А. Энергоемкость искусственного проветривания карьеров / Г.В. Калабин, А.Д. Вассерман, А.А. Бакланов и др. // Горный журнал. - 1991. - № 1. - С. 53-55.

24. Битколов, Н.З. Нормализация атмосферы глубоких карьеров / Битколов Н.З., Пененко В.В.; Ленинград: Наука, 1986. - 295 с.
25. Битколов, Н.З. Условия труда и проветривание карьеров по добыче радиоактивных руд / Битколов Н.З., Никитин В.С.; Москва: Атомиздат, 1978. - 184 с.
26. Буткин, В.Д. Развитие методов и средств проветривания глубоких карьеров / А.С. Морин, В.Д. Буткин, В.В. Кравцов, Д.Б. Нехорошев; Москва: МАКС Пресс, 2004. - 135 с.
27. Ворошилов, Я.С. Современные методы измерения концентрации пыли / Ворошилов Я.С., Фомин А.И. // Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». - 2019. - С. 111-112.
28. Вассерман, А.Д., Козырев С.А. Научные основы создания и поддержания безопасного состояния воздушной среды при отработке месторождений полезных ископаемых. В кн.: Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе / Вассерман А.Д., Козырев С.А.; Апатиты: КНЦ РАН, 2005. - с. 144-149.
29. Вершинин, А.А. Аналитические и экспериментальные исследования искусственного проветривания карьеров свободными струями: дис. канд. техн. наук. / Вершинин А.А.; Свердловск, 1966. - 167 с.
30. Головизнин, В.М. Моделирование турбулентной естественной конвекции в замкнутых вытянутых по высоте областях / Головизнин В.М., Короткин И.А., Финогенов С.А. // Вычислительная механика сплошных сред. - 2016. - Т. 9, № 3. - С. 253-263.
31. Гридина, Е.Б. Опыт математического моделирования процесса проветривания Оленегорского карьера в программном комплексе Flow Vision / Гридина Е.Б., Петров И.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. – спец. вып. 5-1. - С. 32-42.
32. Гридина, Е.Б., Черкай З.Н. Аэрология горных предприятий (карьеров) / Гридина Е.Б., Черкай З.Н.; Санкт-Петербург: ЛЕМА, 2017. - 190 с.
33. Гендлер, С.Г. Управление аэродинамическими процессами при разработке золоторудных месторождений открытым способом / Гендлер С.Г., Борисовский И.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 99–107. - DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.
34. 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.
35. 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.

36. Гендлер, С.Г. Оценка влияния температурных условий на естественную вентиляцию глубоких карьеров Арктической зоны / Гендлер С.Г., Борисовский И.А. // Устойчивое развитие горных территорий. - 2022. - Т. 14, № 2. - С. 218–227. - DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.

37. Гендлер, С.Г. Проблемы обеспечения безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых арктического региона / Борисовский И.А., Гендлер С.Г. // X Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» - 2020.

38. Гендлер, С.Г. Анализ эффективности естественного проветривания золоторудных карьеров при развитии горных работ на основе математического моделирования аэродинамических процессов / Борисовский И.А., Гендлер С.Г. // X Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» - 2020.

39. Гендлер, С.Г. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики / Борисовский И.А., Гендлер С.Г. // IV Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» - 2021.

40. Гендлер, С.Г. Патент № 2760181 Российская Федерация, МПК E21F 1/00 (2006.01). Способ проветривания глубоких карьеров: № 2021111806: заявлено 26.04.2021 : опубликовано 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.

41. Драгунский, О.Н. Разрушение внутрикарьерных инверсий естественными ветровыми потоками / Драгунский О.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - № 2. - С. 14-19. - DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-14-19.

42. Драгунский, О.Н. О разрушении внутрикарьерных инверсий средствами искусственной вентиляции / Драгунский О.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - № 5. - С. 13-21. - DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-13-21.

43. Демин, Н.В. Отзывы на монографию В.Н. Сытенкова «Управление пылегазовым режимом глубоких карьеров», Москва: Геоинформцентр 2003 / Демин Н.В., Рубцов С.К. // Горный журнал. - 2004. - № 10. - С.88-90.

44. Драгунский, О.Н. Комплексный подход при формулировании задач аэрологии карьеров. Экология и безопасность обработки месторождений полезных ископаемых / Драгунский О.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - спец. вып. 12. - 76 с.
45. Драгунский, О.Н. Некоторые вопросы обеспечения комплексного подхода при постановке задач аэрологии карьеров / Драгунский О.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - спец. вып. 32. - С. 74-79. - DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-32-74-79.
46. Драгунский, О.Н. Исследование разрушения инверсий в карьерах / Драгунский О.Н.; Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук; Москва: МГИ, 1978. - 18 с.
47. Далбаева, Е. П. Обоснование эффективных мер борьбы с пылью на карьерах криолитозоны / Далбаева Е. П. // Записки Горного института. - 2014. - № 207. - С. 110-111.
48. Зорин, А.В. Исследование метеоусловий в районе карьеров «Коашвинский» и «Ньюркпахкский» / Зорин А.В. // Горный журнал. - 2002. - № 4. - С. 90-91.
49. Зорин, А.В. Энергетическая оценка интенсификации естественного воздухообмена в карьерах / Зорин А.В. // Горный журнал. - 2010. - № 11. - С. 85-87.
50. Заиров, Ш.Ш. Повышение эффективности пылеподавления и увеличения коэффициента полезного действия энергии ВВ при массовых взрывах на карьерах / Ш.Ш. Заиров, И.Н. Турсунова // Горный вестник Узбекистана. - 2015. - № 4. - С. 31-34.
51. Кудряшов, В.В. Анализ методов измерения запыленности шахтной атмосферы / Кудряшов В.В., Кобылкин А.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2021. - № 10-1. - С. 29-44. - DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_101\_0\_29.
52. Ковшов, С.В. Установка для моделирования процесса пылеподавления на карьерах открытого типа путем орошения / Ковшов С.В., Гридина Е.Б., Иванов В.В. // Вода и экология: проблемы и решения. - 2018. – Т. 75, № 3. - С. 68 – 75. - DOI: 10.23968/2305–3488.2018.20.3.68–75.
53. Козырев, С.А. 3d компьютерное моделирование характера распределения воздушных потоков на поверхности и в карьерном пространстве глубоких карьеров с учетом реального рельефа местности и масштаба карьера / С.А. Козырев, В.Ф. Скороходов, Р.М. Никитин, П.В. Амосов, В.В. Массан // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2015. - спец. вып. 56. - С. 399-403.
54. Козырев, С.А. Моделирование выноса вредных примесей при проветривании глубоких карьеров с помощью вентиляционных горных выработок / С.А. Козырев, П.В. Амосов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2015. - спец. вып. 56. - С. 390-398.



55. Козырев, С.А. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров / С.А. Козырев, П.В. Амосов // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17, № 2, - С. 231-237.
56. Козырев, С.А. Оценка аэрологической обстановки на открытых горных работах на основе трехмерных моделей карьеров / С.А. Козырев, В.Ф. Скороходов, Р.М. Никитин, П.В. Амосов, В.В. Массан // Вестник МГТУ. - 2015. – Т. 18, № 2, - С. 178-182.
57. Козырев, С.А. Применение CFD-моделей при решении задач рудничной аэрологии / С.А. Козырев, П.В. Амосов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 8. - С. 204-211.
58. Козырев, С.А. Математическое моделирование проветривания тупиковых выработок при взрывных работах с использованием CFD-моделей / С.А. Козырев, П.В. Амосов // Сборник научных трудов. Выпуск 1 «Аэрология и безопасность горных предприятий». - Москва: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. - С. 23-29.
59. Козырев, С.А. Методический подход к оценке времени проветривания тупиковых выработок на базе трехмерного численного моделирования / С.А. Козырев, П.В. Амосов // Вестник МГТУ. - 2017. - Т. 20, № 1/1. - С. 5-12. - DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-5-12.
60. Козырев, С.А. CFD метод в компьютерных технологиях как инструмент исследования аэродинамики глубоких карьеров / С.А. Козырев, В.Ф. Скороходов, Р.М. Никитин, П.В. Амосов, В.В. Массан // Труды Кольского научного центра РАН. - 2014. - Т. 24, № 5. - С. 251-255.
61. Козырев, С.А. Автоматизация проектирования вентиляции подземного рудника / С.А. Козырев, А.В. Осинцева // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12, № 4. - С. 677-682.
62. Конорев, М.М. К вопросу вентиляции и пылегазоподавления в атмосфере карьеров / М.М. Конорев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2006. - спец. вып. 1. - С. 107-126.
63. Конорев, М.М. Анализ теоретических и экспериментальных исследований процессов переноса искусственных осадков при пылегазоподавлении в карьерах / Конорев М.М // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 1997. - спец. вып. 1. - С. 134-137.
64. Кузьмин, С.Н. Обоснование состава оборудования для вентиляции карьера взрывом топливно-воздушной смеси / С.Н. Кузьмин, А.Г. Нестеров, И.М. Фадин, И.В. Бригадин // Записки Горного института. – 2009. - Т. 180. - С. 153-154.
65. Конорев, М.М. Состояние исследований и перспективы применения систем вентиляции и пылегазоподавления в атмосфере карьеров / М.М. Конорев, Г.Ф. Нестеренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - спец. вып. 5. - С. 9-20.

66. Кузьмин, С.Н. Технология импульсного струйного проветривания глубоких карьеров / С.Н. Кузьмин // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2009. – Т. 8, № 2. - С. 60-61.
67. Конорев, М.М. Система радиоуправления карьерными вентиляторами с подсистемой передачи данных с газоаналитических станций и каналом передачи данных на ЭВМ «Диспетчер-2» /Ледерман А.И., Конорев М.М. и др. // Эффективные технологии при разработке полезных ископаемых: Тез. докл. конф., ИГД, Черметинформация. – 1990. - С. 109-110.
68. Козырев, С.А. Моделирование аэродинамических процессов в глубоких карьерах / Козырев С.А., Амосов П.В. // Глубокие карьеры: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Глубокие карьеры». – 2012. – С. 470-474.
69. Козырев, С.А. Моделирование распределения воздушных потоков в глубоких карьерах / Козырев С.А., Амосов П.В. // Горный журнал. - 2014. - № 5. - С. 7-11.
70. Куликов, В.П. Проветривание угольных разрезов / Куликов В.П., Роголис Ю.П.; Москва: Недра, 1973. - 224 с.
71. Конорев, М.М. Вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров / Конорев М.М., Нестеренко Г.Ф., Павлов А.И.; Екатеринбург: УрО РАН, 2010. - 440 с.
72. Косолапов, А.И. К вопросу оценки интенсивности горных работ при разработке месторождений в суровых климатических условиях / Косолапов А.И., Малофеев Д.Е., Кузнецов Д.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2013. - № 2. - С. 35-41.
73. Коршунов, Г. И. Новый химический способ пылеподавления при складировании горной массы / Коршунов, Г. И., Ковшов, В. П., Ковшов, С. В., Ерзин, А. Х. // Записки Горного института. – 2014. Т. 207. - С. 116-120.
74. Каменский, А.А. Исследования коагуляции пылевой фракции при применении аэропенного способа пылеподавления / Каменский А.А. // Записки Горного института. – 2011. Т. 189. - С. 138-140.
75. Конорев, М.М. Исследования и перспективы создания систем вентиляции и пылегазоудаления и глубоких карьерах / М.М. Конорев, Г.Ф. Нестеренко // Горный журнал. - 2012. - № 1. - С. 93-96.
76. Косарев, Н.П. Аэродинамика вентиляционных процессов и устройств на глубоких карьерах / Н.П. Косарев, С.А. Тимухин, Ю.В. Попов; Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного горного университета, 2009. - 155 с.
77. Конорев, М.М. К вопросу снижения негативного воздействия на окружающую среду массовых взрывов в карьерах / Конорев М.М., Нестеренко Г.Ф. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2005. - № 1. - С. 109-113.

78. Качурин, Н.М. Диффузия пылегазовых примесей в атмосфере от точечного источника загрязнения воздуха / Качурин Н.М., Комиссаров М.С., Королева О.С. // Известия вузов. Горный журнал. - 2012. - №5. - С. 73-79.
79. Конорев, М.М. Искусственная вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров. - Дисс. на соис. уч. степени докт.техн.наук. / Конорев М.М.; Москва: МГГУ, 1999. - 363 с.
80. Конорев, М.М. Конструктивные особенности и технико-экономические показатели карьерного вентилятора-оросителя НК-12КВ-1М / С.С. Филатов, М.М. Конорев, Г.Ф. Нестеренко и др. // Горный журнал. - 1981. - № 6. - С. 43-46.
81. Конорев, М.М. Система вентиляции и всесезонного пылегазоподавления / Конорев М.М., Росляков СМ. и др.// Горный журнал. - 1990. - № 7. - С.47-49.
82. Конорев, М.М. Проблемы нормализации атмосферы на открытых горных работах отрасли / В.Н. Мосинец, А.Н. Лукьянов, П.А. Аверкин, М.М. Конорев // Горный журнал. - 1991. - № 1. - С. 48-52.
83. Коркин, Ю.М. Создание и применение карьерных вентиляторных установок типа УМП / Коркин Ю.М., Заслов В.Я., Тарасов В.Н. и др. // Горный журнал. - 1984. - № 11. - С. 43-45.
84. Конорев М.М. Обоснование проектных решений при разработке системы искусственной вентиляции и пылегазоподавления карьера трубки «Мир» / Конорев М.М., Макаров В.Н., Нестеренко Г.Ф. и др. // Горный журнал. - 1984. - № 9. - С. 57-59.
85. Конорев, М.М. Оценка опыта и перспектив искусственной вентиляции карьеров вертикальными струями / Конорев М.М., Блонский М.В.; Доклады Международной конференции. Проблемы геотехнологии и недроведения. Екатеринбург, 1998, - Т. 1. - С. 315-324.
86. Конорев, М.М. Выбор вертолетного винта в качестве ротора карьерного вентилятора / Конорев М.М., Блонский М.В., Нестеренко Г.Ф. // Горный информационно аналитический бюллетень. - 2002. - № 4. - С. 196-198.
87. Коркин, Ю.М. Опыт искусственного проветривания Саамского карьера / Коркин Ю.М., Тарасов В.Н., Гуцин В.З. и др. // Горный журнал. - 1981. - № 5. - С.59-60.
88. Конорев, М.М. Система «Диспетчер-1» телеконтроля параметров атмосферы и управления карьерными вентиляторами / Конорев М.М., Макаров В.Н., Ледерман А.И.; Теоретические и прикладные вопросы воздухообмена в глубоких карьерах: Тез. докл. конф. - Апатиты: КФ АН СССР, 1985. - С. 160-161.
89. Лапшин, А.А. Охлаждение рудничного воздуха с использованием шахтных вод / Лапшин А.А. // Горный журнал. - 2014. - № 5. - С. 104-107.

90. Морин, А.С. Трубопроводная вентиляция на карьерах / Морин А.С. // Горная промышленность. - 2002. - № 3. - С.40-43.
91. Морин, А.С. Исследование динамических схем комбинированного трубопроводного проветривания карьеров / А.С. Морин, Ф.И. Борисов, И.В. Корзухин // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2010. – Т. 41, № 1. - С. 174-179.
92. Маслобоев, В.А. Результаты оценки интенсивности пыления хвостохранилищ / В.А. Маслобоев, А.А. Бакланов, П.В. Амосов // Вестник МГТУ. – 2016. Т. 19, № 1/1, - С. 13-19.
93. Маслобоев, В.А. Исследование влияния скорости ветрового потока и высоты хвостохранилища на загрязнение атмосферы (на базе численного моделирования) / В.А. Маслобоев, А.А. Бакланов, П.В. Амосов // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. - 2016. - С. 281-286.
94. Маслобоев, В.А. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища АНОФ-2 / В.А. Маслобоев, А.А. Бакланов, С.И. Мазухина, О.Ю. Ригина, П.В. Амосов // Вестник МГТУ. – 2014. - Т. 17, № 2. - С.376-384.
95. Маслобоев, В.А. Компьютерное моделирование процессов пыления хвостохранилища / В.А. Маслобоев, А.А. Бакланов, С.И. Мазухина, П.В. Амосов // Вестник Кольского научного центра РАН. - 2013. - Т. 14, № 3. - С. 44-49.
96. Маслобоев, В.А. Влияние скорости ветрового потока и высоты хвостохранилища на уровень загрязнения атмосферы / Маслобоев В.А., Бакланов А.А., Амосов П.В. // Известия вузов. Горный журнал. – 2016. - № 3. - С. 67-73.
97. Никулин, А.Н. Оценка эффективности и результативности системы управления охраной труда и промышленной безопасностью на горнодобывающем предприятии / Никулин А.Н., Должиков И.Н., Климова И.В., Смирнов Ю.Г. // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – Т. 1. – № 2. – С. 66-72.
98. Никитин, В.С. Проветривание карьеров / Никитин В. С., Битколов Н. З.; Недра, 1975. – 248 с.
99. Нестеренко, Г.Ф. Управление аэрогазодинамическими тепломассобменными процессами при нормализации атмосферы карьеров: Автореф. дис. д-ра техн. наук. / Нестеренко Г.Ф.; Пермь: ИГД УрО РАН, 2008. - 45 с.
100. Пененко, В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов / Пененко В.В.; Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. - 352 с.
101. Павлов, А.И. Исследование и разработка средств местного проветривания карьеров: дис. канд. техн. наук. / Павлов А.И.; Свердловск, 1971. - 175 с.

102. Попов, Ю.В. Комплексное использование оборудования наклонных подъемных установок для решения проблем водоотлива и вентиляции глубоких карьеров / Ю.В. Попов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 1997. - спец. вып. 1. - С. 134-137.
103. Романченко, С.Б. Комплексное обеспыливание / Романченко С.Б., Тимченко А.Н., Костеренко В.Н., Поздняков Г.А., Руденко Ю.Ф., Артемьев В.Б., Копылов К.Н. // Промышленная безопасность. Библиотека горного инженера. – 2016. Т. 6. – 132 с.
104. Рогалев, В.А. Методические особенности интенсификации естественного проветривания карьеров / Рогалев В.А., Ястребова К.Н. // Записки Горного института. - 2014. - Т. 207. - С. 131-133.
105. Сытенков, В.Н. О целесообразности искусственного проветривания глубоких карьеров / Сытенков В.Н. // Горный журнал. - 1994. - № 12. - С. 47-49.
106. Сытенков, В.Н. Управление пылегазовым режимом глубоких карьеров / Сытенков В.Н.; Москва: ООО «Геоинформцентр», 2004. - 288 с.
107. Смирнов, Ю.Д. Использование пароконденсационного способа пылеподавления при различных технологических операциях добычи полезных ископаемых / Смирнов Ю.Д., Каменский А.А., Иванов А.В. // Записки Горного института. – 2020. - Т. 186. - С. 82-85.
108. Смирнов, Ю.Д. Разработка инновационного пылеподавляющего устройства для условий северных регионов / Смирнов Ю.Д., Ковшов С.В., Иванов А.В. // Записки горного института. – 2012. - Т. 195. - С. 133-137.
109. Старостин, И.И. Интенсификация аэрации карьеров с применением направляющих устройств / Старостин И.И., Бондаренко А.В. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. - 2013. - № 6. - С. 63-70. - DOI: 10.7463/0613.0577364.
110. Старостин, И.И. Проветривание карьеров струйными вентиляторами в комплексе с устройством для аэрации / Старостин И.И., Бондаренко А.В. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. н.э. Баумана. - 2015. - № 1. - С. 32-41. - DOI: 10.7463/0115.0755210.
111. Тренчек, С. Использование новой системы аэрологического мониторинга для повышения безопасности работ в угольных шахтах / С. Тренчек, П. Войтас, Дж. Кельльер // Сборник научных трудов. Выпуск 1 «Аэрология и безопасность горных предприятий». Москва: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. - С. 11-22.
112. Трубицын, А.А. Разработка системы мониторинга интенсивности пылеотложений и методики прогноза запыленности воздуха / Трубицын А.А., Подображин С.Н., Скатов В.В., Ворошилов Я.С., Мусинов С.Н., Трубицына Д.А. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. - 2016. - № 1. - С. 6-13.
113. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции / Талиев В.Н.; Москва: Стройиздат, 1979. - 295 с.

114. Ушаков, К.З. Аэрология карьеров / Ушаков К.З., Михайлов В.А.; Москва: Недра, 1975. - 248 с.
115. Ушаков, К.З. Рудничная аэрология / Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И.; Москва: Недра, 1978. - 440 с.
116. Филатов, С.С. Нормализация состава атмосферы в глубоких карьерах / Филатов С.С. // Горный журнал. - 1987. - № 2. - С. 35-37.
117. Фомин, С.И. Анализ чувствительности параметров рудных карьеров на предварительной стадии проектирования / Фомин С.И., Базарова Е.И. // Записки Горного института. – 2015. - Т. 216. – С. 76-81.
118. Фомин, С.И. Обоснование технологических решений при организации отработки рудных карьеров / Фомин С.И. // Записки Горного института. – 2016. – Т. 221. – С. 644-650. - DOI 10.18454/PMI.2016.5.644.
119. Филатов, С.С. Установки для вентиляции карьеров вертикальными струями / Филатов С.С. и др. // Цветная металлургия. - 1971. - № 13. - С. 12-14.
120. Файнбург, Г.З. Повышение эффективности проветривания тупиковых комбайновых выработок калийных рудников по пылевому фактору / Файнбург Г.З., Исаевич А.Г., Зайцев А.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 38–50. - DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_38.
121. Филатов, С.С. Исследование способа и разработка средств искусственной вентиляции карьеров: дис. докт. техн. наук. / Филатов С.С.; Свердловск, 1973. - 240 с.
122. Черкай, З.Н. Технологические проблемы и основные положения методики инженерно-геокриологических исследований при строительстве и эксплуатации скважин в многолетнемерзлых породах / З.Н. Черкай, Е.Б. Гридина // Записки Горного института. - 2017. - Т. 223. - С. 82-85. - DOI: 10.18454/PMI.2017.1.82.
123. Шахрай, С.Г. Новые технические решения по проветриванию глубоких карьеров / С.Г. Шахрай, Г.С. Курчин, А.Г. Сорокин // Записки Горного института. - 2019. - Т. 240. - С. 654-659. - DOI: 10.31897/PMI.2019.6.654.
124. Шувалов, Ю.В. Снижение пылеобразования и переноса пыли при разрушении горных пород / Шувалов Ю.В., Ильченкова С.А., Гаспарьян Н.А., Бульбашев А.П. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. - № 10. - С. 75–78.
125. Швыряев, А.А. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе / Швыряев А.А., Меньшиков В.В.; Учебное пособие для вузов. - Москва: Изд-во МГУ, 2004. – 124 с.
126. Alosmanov, M.S. Development of an Effective Method for Preventing Dust Pollution in Stone Quarries Using Petroleum Refinery Wastes / Alosmanov M.S., Mammadov V.A., Khalilova

H.Kh., Bayramov C.M. // *Journal of Environmental Protection*. – 2015. - № 6, - pp. 1118-1123. - DOI: 10.4236/jep.2015.610098.

127. Abdelhafid, Essalhi. Environmental Impact of Mining Exploitation: A Case Study of Some Mines of Barite in the Eastern Anti-Atlas of Morocco / Abdelhafid Essalhi, Mourad Essalhi, Abdeslam Toummite // *Journal of Environmental Protection*. – 2016. - V. 7, № 11, - pp. 23-34. - DOI: 10.4236/jep.2016.711124.

128. Awwad, Titi. Environmental Effects of the Open Cast Mining a Case Study: Irbid Area, North Jordan / Awwad Titi, Mohammed Dweirj, Khalid Tarawneh // *American Journal of Industrial and Business Management*. – 2015. V. 5, № 6. – pp. 45-64. - DOI: 10.4236/ajibm.2015.56041.

129. Amosov, P.V. Estimating air pollution levels by numerical simulation depending on wind flow speed and dust source area / Amosov P.V., Baklanov A.A., Makarov D.V., Masloboev V.A. // «Известия вузов. Горный журнал». – 2020. - № 5. - С. 80-89. - DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-80-89.

130. Abdulwahid, M.A. Numerical Analysis of Two Phase Flow Patterns in Vertical and Horizontal Pipes / Abdulwahid M.A., Kareem H.J., Almudhaffar M.A. // *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*. – 2017. - V. 12. - pp. 131-140.

131. Alvarado, M. Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites / Alvarado M., Gonzalez F., Fletcher A., Doshi A. // *Sensors*. – 2015. - № 15. – 19667 p.

132. Arpacioğlu, C.B. Estimation of fugitive dust impacts of open-pit mines on local air quality-a case study: bellavista gold mine, Costa Rica / Arpacioğlu C.B., Er C. // *18th International Mining Congress and Exhibition of Turkey IMCET*. – 2003. – pp. 220-235.

133. Bhowmick, T. Three-dimensional modeling of fugitive dust dispersion in idealized open pit mines / Bhowmick T., Raj K.V., Bandopadhyay S. // *Min. Eng.* – 2015. № 67. – pp. 45–52.

134. Boland, B.B. Dust control and ventilation in an open pit iron mine / Boland, B.B. // *Canadian Mining Journal*. – 1965. - pp. 72-75.

135. Du, C.F. Numerical simulation and experimental study on distribution and evolution law of inversion layer in deeply sunken open pit mines / Du C.F., Jin W.B., Ying Z. // *Gummi, Fasern, Kunstst.* – 2016. - № 14. - pp. 606-611.

136. Ginoux, P. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model / Ginoux P., Chin M., Tegen I., Prospero J.M., Holben B., Dubovil O., Lin S.J. // *Journal of Geophysical Research*. - 2001. - V. 20. – pp. 20255–20273.

137. Gridina, E.B. Mathematical modeling based on CFD method of wind currents in combined working out of the Olenegorsky pit in the FlowVision software package / Gridina E.B.,

Andreev R.E. // *International Review on Modelling and Simulations*. – 2017. – V. 10. – № 1. - pp. 62-69. - DOI:10.15866/iremos.vl0il.11101.

138. Huang, Z. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines / Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. // *Applied ecology and environmental research*. – 2019. - V. 17, № 5. - pp. 10313-10333. - DOI: 10.15666/aer/1705\_1031310333.

139. Holman, C. Guidance on the Assessment of Mineral Dust Impacts for Planning / Holman C., Datson H., Dawson M., McHale R., Pullen J., Srinivas, Stone M.I., Wilson P. // *The Institute of Air Quality Management*. – 2016. – V. 1.1. - pp. 1-47.

140. Idris, G.N. Environmental Impact on Surface and Ground Water Pollution from Mining Activities in Ikpeshi, Edo State, Nigeria / Idris G.N., Asuen G.O., Ogundele O.J. // *International Journal of Geosciences*. – 2014. - V. 5, № 7. – pp. 43-67. - DOI: 10.4236/ijg.2014.57067.

141. Jin, L.Z. Winter inversion compare of fushun west strip mine and typical plain area / Jin L.Z., Zhang G.Y., Gao P., Wei W. // *Energy Environ. Prot.* – 2015. - № 19. – pp. 47–49.

142. Jakoef, A. Dust Suppression System on and Open Pit Mine / Jakoef A., Vermeulen H.J. // *Media in Africa*. - 2012. – pp. 15-26.

143. Kovshov, S. Chemical Technology of Dust Suppression on Open-Pit Mines / Kovshov S., Kovshov V. // *International Journal of Ecology & Development*. - 2015. – V. 30, № 3. - pp. 55–67.

144. Konorev, M.M. The issue of reducing the negative environmental impact of mass explosions in quarries / Konorev M.M., Nesterenko G.F. // *Mining Information and Analytical Bulletin*. – 2005. - № 1. - pp. 109-113.

145. Korshunov, G. Dust control methods in open-pit mining / Korshunov G., Kovshov S., Safina A. // *Current state of physical and chemical research. Ecology, Environment and Conservation Paper*, New Delhi, India. – 2017. - V. 23, № 2. - pp. 883-889.

146. Lin, L. Monitoring and prediction of dust concentration in an open-pit mine using a deep-learning algorithm / Lin L., Ruixin Z., Jiandong S., Qian H., Lingzhen K., Xin L. // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. – 2021. – pp. 401-414. - DOI: 10.1007/s40201-021-00613-0.

147. Lu, G.R. Characteristics of meteorological changes in Baiyin deep concave open pit mine and its influence on dust pollution / Lu G.R., Cai J.Y., Tang Z.P., Liu B.Y., Ma D.W. // *Met. Min.* – 1986. - № 19. – pp. 4-8.

148. Pages, M. Determining temperature lapse rates over mountain slopes using vertically weighted regression: a case study from the Pyrenees / Pages M., Miro J.R. // *Meteorol. Appl.* – 2010. - № 17. – pp. 53-63.



149. Raj, K.V. Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures - Raj K.V. // 10.03.2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756>.
150. Rudakov, M.L. Improvement of working conditions of mining workers by reducing nitrogen oxide emissions during blasting operations / Rudakov M.L., Babkin R.S., Medova E.A. // *Applied Sciences*. – 2021. – № 11. – pp. 1-13.
151. Setenko, B.H. The formation mechanism of temperature inversion in open pit / Setenko B.H., Filipov C.A., Lu G.R. // *Foreign Met. Min.* – 1992. - № 12. – pp. 26- 27.
152. Surridge, A.D. The evolution of the nocturnal temperature inversion / Surridge A.D. // *Boundary-Layer Meteorol.* – 1986. - № 36. – pp. 295-305.
153. Sidney, C.J. Combined removal of SO, NO and fly ash. From simulated flue gas using pulsed streamer corona / Sidney C.J. // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1989. – V. 25, № 1. – pp. 62-69.
154. Tukkaraja, P. Using numerical simulations to evaluate problems caused by temperature inversions in surface mines / Tukkaraja P., Keerthipati M., French A. // *Proc. S. D. Acad. Sci.* – 2016. – № 95. – pp. 125-132.
155. Tang, W. Dust distribution in open-pit mines based on monitoring data and fluent simulation / Tang W., Cai Q. // *Environ. Monit. Assess.* – 2018. - № 190. – 632 p.
156. Tverda, O. Comparative analysis of methods to minimize dust from granite mine dumps / Tverda O., Tkachuk K., Davydenko Y. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 80, № 2/10. - pp. 40-46. - DOI: 10.15587/1729-4061.2016.64840.
157. Tariq, F. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD / Tariq F., Bekir G. // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. - V. 27, № 2. - pp. 253-259. - DOI: 10.1016/J.IJMST.2017.01.012.
158. Vella, A.J. Fine dust emissions from softstone quarrying in Malta Department of Chemistry / Vella A.J., Camilleri R. // *University of Malta. Xjenza*. – 2005. - pp. 47-54.
159. Witrant, E. Air flow modeling in deep wells: Application to mining ventilation / Witrant E., Johansson K.H. // *4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering*. - 2008. - pp. 845 – 850.
160. Wang, Y. Distribution law of the temperature inversion layer in a deep open-pit mine / Wang Y., Du Cf. // *ACS OMEGA*. – 2021. - V. 6, № 12. - pp. 8693-8699. - DOI: 10.1021/acsomega.1c00674.
161. Wang, Zhi-Ming Dust reduction method based on water infusion blasting in open-pit mines: a step toward green mining / Wang Zhi-Ming, Zhou Wei, Jiskani Izhar Mithal, Ding Xiao-Hua,

Liu Zhi-Chao, Qiao Yan-Zhen, Luan Boyu // Energy sources part a-recovery utilization and environmental effects. – 2021. - pp. 1-16. - DOI: 10.1080/15567036.2021.1903118.

162. Wang, Yuan Key Factor Analysis and Model Establishment of Blasting Dust Diffusion in a Deep. Sunken Open-Pit Mine / Wang Yuan, Du Cuifeng, Xu Haiyue // ACS OMEGA. – 2021. - V. 6, № 1. - pp. 448-455. - DOI: 10.1021/acsomega.0c04881.

163. Wei, D. Temporal–spatial distribution of vehicle transportation pavement dust migration in an open-pit mine / Wei D., Du C., Lin Y., Chang B., Wang Y. // ACS Omega. – 2020. - № 5. – pp. 16030-16036.

164. Wang, H.Z. About the ventilation problem of deep concave openpit mine / Wang H.Z. // Met. Min. – 1981. – V. 2. – pp. 8-11.

165. Wang, Y. Key factor analysis and model establishment of variation of rock face temperature in a deep open-pit mine / Wang Y., Du C.-f., Jin W.-b., Wang P.-y. // J. Cent. South Univ. – 2018. – V. 25. – pp. 1786-1798.

166. Zvyagintseva, A.V. Measures to Improve Working Conditions and Reduce Dust and Gas Emissions in the Quarries of the Mining and Processing Plant / Zvyagintseva A.V., Sazonova S.A., Kulneva V.V. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. - № 459. - pp. 1-6. - DOI: 10.1088/1755-1315/459/5/052047.

167. Zhao, M. A method of predicting the height of inversion / Zhao M., Wang Y.C., Jin H. // Sci. Meteorol. Sin. – 1987. - № 4. – pp. 24-30.

168. Zvyagintseva, A.V. Analysis of dust formation during explosions at a quarry of a mining and processing plant / Zvyagintseva A.V., Zavyalova A.Yu. // Proceedings of the Fifth International Environmental Congress (Seventh International Scientific Technical Conference) “Ecology and Life Protection of Industrial-Transport Complexes” ELPIT. – 2015. – V. 5, № 307. – pp. 137-142.

169. Zvyagintseva, A.V. A study of the composition of a dust and gas cloud in the air of a working zone during explosions at a quarry of a mining enterprise / Zvyagintseva A.V., Zavyalova A. Yu. // Fundamental problems of system security: materials of the III school-seminar of young scientists. – 2016. - № 251. – pp. 231-235.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение способа проветривания глубоких карьеров

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2760181**

**СПОСОБ ПРОВЕТРИВАНИЯ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ**

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

Авторы: *Гендлер Семён Григорьевич (RU), Лейсле Артём Валерьевич (RU), Борисовский Иван Анатольевич (RU)*

Заявка № 2021111806

Приоритет изобретения 26 апреля 2021 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 22 ноября 2021 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 26 апреля 2041 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акт внедрения


**Утверждаю**  
 Генеральный директор АО «ПитерГОРпроект»  
 И.Э. Богуславский  
 2022 г.

#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов кандидатской диссертации  
 Борисовского Ивана Анатольевича по научной специальности  
 2.8.6 «Геомеханика, взрывные работы, рудничная аэрогазодинамика и горная  
 теплофизика»

Научно-технический совет АО «ПитерГОРпроект» в составе:

Председателя:

Богуславской Людмилы Игоревны-кандидата экономических наук;

Членов совета:

Козлова Евгения Никитовича-кандидата технических наук;

Авгулевича Даниила Леонидовича-кандидата геолого-минералогических наук;

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Аэрологическое обоснование комбинированных схем проветривания глубоких золоторудных карьеров арктической зоны России», представленной на соискание учёной степени кандидата наук внедрены в проект вентиляции золоторудного карьера горнодобывающего предприятия АО «Полус Магадан» и могут быть реализованы в дальнейшем в проектной деятельности «ЗАО "Санкт-Петербургская горная проектно-инжиниринговая компания ("ПитерГОРпроект")» для совершенствования технических решений по проветриванию карьеров при глубине горных работ, превышающей 200 м, на основе использования системы горных выработок для подачи наружного воздуха в зоны, потенциально опасные для накопления загрязняющих веществ.

По результатам разработок получен один патент.

Использование полученных в диссертации результатов позволит повысить безопасность и эффективности добычи золотосодержащей руды на больших глубинах золоторудных карьеров Арктической зоны России.

Рекомендуемые для использования результаты были получены при выполнении госбюджетной работы кафедры безопасности производств «Разработка научной концепции и инновационных способов минимизации рисков аварий, производственного травматизма и профессиональных заболеваний при разработке месторождений полезных ископаемых в условиях сурового климата на основе учёта аэро-газо-термодинамических процессов и использования энергосберегающих технологий», шифр 13.23.01

**Председатель комиссии:**

Заместитель  
генерального директора  
к.э.н.

 Л.И. Богуславская

**Члены комиссии:**

Начальник  
Горного управления  
к.т.н.


Е.Н. Козлов

Главный специалист  
к.г/м.н.

Д.Л. Авгулевич