

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет»

На правах рукописи



Трушкова Надежда Анатольевна

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ В  
СИСТЕМАХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук  
Левин Лев Юрьевич

Пермь 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА .....	10
1.1. Исследования и направления применения рециркуляционного проветривания .....	11
1.2. Изучение динамики газового состава рудничной атмосферы .....	15
1.3. Математические модели газораспределения в горных выработках .....	18
1.4. Существующие подходы к расчету и организации рециркуляционного проветривания .....	26
1.5. Цель и задачи исследования.....	36
2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗЕРВОВ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ПО ГАЗОВОМУ ФАКТОРУ .....	38
2.1. Натурные исследования газового состава воздуха в условиях рудника Верхнекамского месторождения калийных солей .....	40
2.2. Натурные исследования газового состава воздуха в условиях медно-никелевых рудников Норильского промышленного района.....	43
2.3. Анализ влияющих факторов на газовый состав исходящей струи воздуха .....	57
2.4. Натурные исследования внутренних утечек на подземных рудниках .....	61
2.5. Исследование влияния внутренних утечек на возможность рециркуляционного проветривания.....	64
2.6. Выводы.....	75
3. РАЗРАБОТКА КОНВЕКТИВНО-ДИФФУЗИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК.....	77
3.1. Математическая постановка задачи расчета газораспределения в сети горных выработок .....	78
3.2. Разработка численного метода решения задачи расчета газораспределения в сети горных выработок .....	82
3.3. Исследование диффузионных процессов переноса газов по длине горных выработок .....	91
3.4. Выводы.....	99
4. РАЗРАБОТКА СХЕМ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ .....	100
4.1. Методология организации схем рециркуляционного проветривания подземных рудников .....	100
4.2. Определение оптимальных параметров рециркуляционного проветривания в зависимости от аэродинамических характеристик вентиляционной сети .....	105
4.3. Исследование аэродинамических параметров вентиляционных сетей рудников .....	110
4.4. Разработка типовых рециркуляционных схем вентиляции подземных рудников при применении различных схем вскрытия месторождений.....	113

4.5. Выводы.....	117
5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ .....	118
5.1. Обоснование условий безопасного применения рециркуляционных систем ....	118
5.2. Методика разработки схемы и определения параметров рециркуляционного проветривания .....	124
5.2.1. Исследования качества воздуха исходящей струи .....	125
5.2.2. Разработка модели вентиляционной сети и расчет воздухо- газораспределения .....	126
5.2.3. Разработка схемы рециркуляционного проветривания и определение места размещения рециркуляционной установки .....	129
5.2.4. Определение коэффициента рециркуляции и параметров рециркуляционной установки .....	131
5.2.5. Проверка условий безопасности применения рециркуляции.....	132
5.3. Технические требования к рециркуляционным вентиляторным установкам ....	135
5.4. Опыт внедрения систем рециркуляционного проветривания на рудниках ОАО «Беларуськалий» и ПАО «Уралкалий» .....	139
5.4.1. Рециркуляционная система рудника БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий».....	140
5.4.2. Рециркуляционная система рудника ЗРУ ОАО «Беларуськалий» .....	143
5.5. Выводы.....	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	147
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	149

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы диссертации

Проветривание и воздухоподготовка на современных подземных горнодобывающих предприятиях является важнейшим технологическим процессом, определяющим безопасность ведения горных работ. На подготовку, подачу и распределение воздуха по горным выработкам приходится до 70 % общих энергетических затрат на горном предприятии, поэтому энергоэффективность систем вентиляции напрямую определяет рентабельность разработки полезных ископаемых.

На сегодняшний день многие горнодобывающие предприятия увеличивают мощности добычи полезных ископаемых как по причине роста потребности мирового рынка в минерально-сырьевых ресурсах, так и по причине снижения содержания полезного компонента в добываемых рудах. Этим обусловлена необходимость подачи дополнительных расходов свежего воздуха, требуемого для нормативного проветривания рабочих зон в условиях роста труднопроветриваемых зон и ограниченности пропускной способности вентиляционных стволов.

Одним из известных способов существенного повышения эффективности систем вентиляции горных предприятий является организация частичного повторного использования воздуха на основе рециркуляционного проветривания. Исследованиями и внедрением систем рециркуляции на горнодобывающих предприятиях занимались такие специалисты, как Медведев И.И., Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З., Мохирев Н.Н., Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Круглов Ю.В. и ряд других, за рубежом исследования по данной тематике проводили M.J. McPherson, Josef S. Stachulak, J.P. Saindon и другие.

Несмотря на полученные результаты, свое основное применение рециркуляционное проветривание получило лишь на калийных рудниках, в то время как на рудниках других типов были испытаны только отдельные варианты различных назначений и масштаба, отсутствует методическая база применения стандартных схем рециркуляционного проветривания. Кроме того, невозможность сведения структуры потоков при рециркуляции к классическим схемам типа «дерева», отсутствие жесткого деления струй на «свежие» и «исходящие» требуют расчета не только воздухораспределения, но и газовой (тепловой, пылевой) обстановки путем численного моделирования процессов распространения газовых примесей в сложных вентиляционных сетях, характерных для современных шахт и рудников.

Все это осложняется изменением нормативных документов, не описывающих принципы и методы построения допустимых по требованиям безопасности схем

рециркуляционного проветривания. В этих условиях разработка обоснований безопасности для внедряемых схем рециркуляционного проветривания требует наличия научно обоснованной методики построения безопасных схем рециркуляционного проветривания и соответствующего инструментария.

Поэтому создание методики и инструментов построения эффективных и надежных стандартизированных схем рециркуляционного проветривания представляется весьма актуальным.

### **Цель работы**

Разработка методики построения схем рециркуляционного проветривания для повышения эффективности систем вентиляции подземных рудников.

### **Основная идея работы**

Организация частичного повторного использования воздуха в системах вентиляции подземных рудников на основе схем рециркуляционного проветривания, разрабатываемых на основе моделирования и натурных исследований, с учетом максимального использования внутренних утечек и непостоянства действия источников газовыделения в сети горных выработок произвольной топологии.

### **Основные задачи работы:**

1. Провести натурные исследования газового состава рудничного воздуха в системах проветривания рудников различного типа и определить факторы, влияющие на безопасность и эффективность рециркуляционного проветривания рабочих зон.
2. Провести натурные исследования внутренних утечек воздуха и аэродинамических параметров систем вентиляции шахт и рудников для параметрического обеспечения расчетов безопасного применения рециркуляционного проветривания.
3. Разработать математическую модель расчета газовой обстановки в сети горных выработок произвольной топологии с учетом продольной дисперсии и наличия рециркуляционных контуров.
4. Разработать стандартизированные схемы рециркуляционного проветривания для типовых схем проветривания рудников и рабочих зон.
5. Разработать методику организации рециркуляционного проветривания подземных рудников произвольного типа с учетом их аэродинамических и газодинамических особенностей.

**Методы исследований** предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования газового состава рудничного воздуха в шахтных и лабораторных условиях, обработку результатов экспериментов, математическое моделирование распространения газовых примесей в вентиляционной сети, анализ результатов численных экспериментов.

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

1. Эффективность рециркуляционного проветривания рабочих зон определяется характером и величинами переменных во времени и в пространстве газовыделений, схемой вентиляции и связанными с ней величинами расходов воздуха и утечек свежего воздуха внутри рециркуляционного контура.
2. Математическая модель конвективно-диффузионного массопереноса в вентиляционных сетях произвольной топологии, учитывающая непостоянство величины продольной дисперсии газа из-за переменной по сечению скорости и взаимодействие воздушных масс в сквозных и примыкающих к ним тупиковых горных выработках, позволяет рассчитывать нестационарное газораспределение в подземных рудниках.
3. Способы организации рециркуляционного проветривания, обоснованные натурными исследованиями и методами математического моделирования, включающие расчет параметров рециркуляции на основе аэродинамических и газодинамических характеристик вентиляционной сети, позволяют повысить безопасность и энергоэффективность вентиляции подземных рудников.

**Научная новизна:**

- Экспериментально установлены закономерности распределения концентраций газовых примесей по траекториям движения воздушной струи в рудниках различных типов.
- Разработано выражение для расчета коэффициента запаса к расчету требуемого количества воздуха с учетом совместного влияния коэффициентов утечек и рециркуляции.
- Предложено описывать процессы смешения в сквозных выработках с помощью модели продольной дисперсии, а в тупиковых выработках с помощью модели продольной диффузии, где коэффициент продольной диффузии определяется по интенсивности вихревого обмена со смежными сквозными выработками.

- Определены схемы эффективной организации рециркуляционного проветривания в привязке к типовым схемам проветривания подземных рудников и их аэродинамическим параметрам.
- Обосновано влияние параметров проветривания и места размещения рециркуляционной установки относительно главных воздухоподающих и вентиляционных выработок на энергоэффективность рециркуляционного проветривания.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натурных измерений, соответствием приведенных результатов данным, полученным другими авторами и значительным объемом исследований, выполненных в шахтных условиях.

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

Полученные в диссертационной работе результаты позволяют выполнять расчеты и проектирование рециркуляционных систем подземных рудников любого типа с соблюдением условия безопасности проветривания.

Результаты исследований применены при разработке и внедрении более 20 рециркуляционных установок на калийных рудниках 1 РУ, 2 РУ, 3 РУ, 4 РУ, Березовском, Краснослободском и Петриковском рудниках ОАО «Беларуськалий» и рудниках БКПРУ-2, БКПРУ-4 и СКРУ-3 ПАО «Уралкалий», что привело к повышению эффективности проветривания добычных участков и значительной экономии электроэнергии на проветривание и воздухоподготовку.

Материалы диссертационной работы использованы при разработке действующих в настоящее время инструкций по расчету требуемого количества воздуха для рудников ПАО «Уралкалий» и ОАО «Беларуськалий».

Также результаты работы использованы при разработке Обоснований безопасности опасного производственного объекта для рудников ПАО «Уралкалий» в части отступлений от пунктов №153, №174 и №653 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ ...» [66]. На разработанные Обоснования безопасности получены положительные заключения экспертизы промышленной безопасности. Указанные заключения внесены в реестр заключений Ростехнадзора.

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

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы в рамках проекта «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими, геомеханическими и аэрологическими процессами при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (рег. номер НИОКТР АААА–А19– 119091690020–0), а также в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2030 годы в рамках проекта «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими и аэрологическими процессами в рудничной атмосфере и массивах горных пород при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (рег. номер НИОКТР 122012000396-6). Также диссертационная работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024 г.).

## **Апробация работы**

Основные результаты работы были доложены на международном симпозиуме студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2009 г.), на Всероссийском молодежном форуме «Нефтегазовое и горное дело» (Пермь, ПНИПУ, 2012 г.), на международной конференции «Горная и нефтяная электромеханика» (Пермь, ПНИПУ, 2015 г.), на всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Горняцкая смена» (Новосибирск, 2015 г.), на научных сессиях «ГИ УрО РАН» «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (Пермь, 2015 — 2019 гг.), на международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2014 г., 2022 г.).

## **Личный вклад автора**

При непосредственном участии автора проведена постановка задач, разработка математических моделей, экспериментальные исследования в шахтных условиях, анализ и обработка полученных данных, теоретические исследования и создание программных продуктов, выполнение расчетов и проведение численных экспериментов, разработка технологий и технических средств и их практическая реализация, сформулированы основные научные положения и выводы.



Практические эксперименты и внедрение результатов исследований были бы невозможны без содействия ведущих специалистов рудников ПАО «Уралкалий» и ОАО «Беларуськалий».

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.т.н. Левину Льву Юрьевичу за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, д.т.н. Зайцеву Артёму Вячеславовичу за консультации и помощь в выполнении работы, д.т.н., проф. Казакову Борису Петровичу и Казаковой Ларисе Викторовне за ценные указания, д.т.н. Сёмину Михаилу Александровичу и д.т.н. Файнбургу Григорию Захаровичу за консультации и ценные указания. Успешной работе над диссертацией способствовала творческая и доброжелательная атмосфера в коллективе и поддержка коллег.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе 9 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Минобрнауки РФ, из них 8 в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science.

### **Объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков и 12 таблиц. Список использованных источников состоит из 116 наименований, в том числе 44 зарубежных.

## 1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА

Добыча и транспортировка полезных ископаемых сопровождается выделением пыли, тепла, а также ядовитых и взрывоопасных газов. Исследования динамики исходящей струи, выполненные с точки зрения пылевого и теплового факторов убедительно доказывают, что пыль, выделяемая в процессе добычи и транспортировки полезных ископаемых, уносится воздушным потоком и под действием сил гравитации оседает на почве и стенках горных выработок на определенном расстоянии от забоя, таким образом концентрация пыли в исходящей вентиляционной струе снижается в зависимости ее минералогического, фракционного и гранулометрического состава, влажности воздуха и скорости его движения. Теплота, выделяемая при работе оборудования, ассимилируется стенками горных выработок, температура воздуха принимает значения температуры окружающего массива горных пород в результате протекания процессов теплообмена, а влажность воздуха меняется в зависимости от обводненности горных выработок и гигроскопичных свойств окружающих горные выработки пород. Таким образом, прогнозирование параметров рудничной атмосферы по пылевому и тепловому факторам в вентиляционных выработках является достаточно изученным вопросом, определяется спецификой шахты или рудника и с точки зрения организации систем рециркуляции должно учитываться, но не требует проведения масштабных исследований.

В свою очередь газы, выделяющиеся в процессе добычи и транспортировки полезных ископаемых, остаются в воздушном потоке и распространяются по всему пути движения воздуха. Также газовый фактор зачастую является определяющим при расчете требуемого количества воздуха и, следовательно, при организации систем вентиляции в целом. Поэтому в настоящей диссертационной работе основное внимание будет уделено исследованиям процессов газораспределения в сети горных выработок, возможностям повторного использования исходящей струи воздуха по газовому фактору и организации систем рециркуляционного проветривания на шахтах и рудниках.

В первой главе работы выполнен обзор существующих исследований и направлений применения рециркуляционного проветривания, изучения газовой обстановки на шахтах и рудниках, математического моделирования и расчета распределения газов в горных выработках, общей методологии и имеющихся разработок в области рециркуляционного проветривания, а также существующего опыта применения рециркуляции в системах вентиляции шахт и рудников.

## **1.1. Исследования и направления применения рециркуляционного проветривания**

Исследованиями применения рециркуляционного проветривания на протяжении многих лет занимались отечественные и зарубежные ученые [86, 96, 101, 112]. Наиболее полно исследования по частичному повторному использованию воздуха изложены в трудах И.И. Медведева, А.Е. Красноштейна и Г.З. Файнбурга [29, 39]. Таким образом в конце прошлого века были проведены теоретические и натурные исследования, установлена возможность и доказана безопасность рециркуляционного проветривания, данные исследования проводились на калийных рудниках и в основном базировались на способности поверхности солей сорбировать вредные примеси из рудничного воздуха, тем самым очищая его. В работе [39] отражен колоссальный объем натурных замеров газового состава рудничного воздуха при различных условиях. Также в работах [16, 17] установлено, что при постоянной мощности источника газовыделения накопления вредных газов в рециркуляционном контуре не происходит.

В отечественной практике рециркуляционные системы вентиляции применялись не только на калийных рудниках, но и для проветривания отдельных участков шахтного поля металлических рудников. Подобные локальные системы были опробованы на шахтах объединения «Северовостокзолото». На основании опытных исследований были разработаны так называемые комбинированные схемы проветривания с частичной рециркуляцией, на которые в 1984 году были переведены 68 шахт этого объединения [67]. Однако в настоящее время на рудниках применяется более мощное оборудование с двигателями внутреннего сгорания и новые виды взрывчатых веществ, поэтому следует провести уточняющие измерения с учетом современной высокоточной приборной базы для обработки проб и определения концентрации газов в рудничном воздухе.

За рубежом применение рециркуляционного проветривания на рудниках различного типа протекало более активно, в качестве примера можно привести угольную шахту Wearmouth, где была организована общешахтная управляемая рециркуляция в 1985 году. В эксплуатации было два добычных горизонта, на каждом из которых было организовано рециркуляционное проветривание, коэффициент рециркуляции достигал 37 % [99,100].

Одним из фундаментальных зарубежных трудов по применению рециркуляции при проветривании шахт и рудников является диссертационная работа Stachulak S. Josef [105]. В целом работа направлена на обоснование рециркуляционного проветривания и приведены примеры применения на нескольких металлических рудниках. При этом выполненные исследования охватывали различные источники газовыделений, такие как

массив горных пород, машины с двигателями внутреннего сгорания и взрывные работы. По результатам исследований представлены основные соотношения для расчета воздушного и газового баланса в рециркуляционных контурах, а также множество экспериментальных данных по газовому составу рудничной атмосферы при применении систем рециркуляции, полученных в натуральных условиях.

Ряд работ посвящен рассмотрению рециркуляционного проветривания как средства интенсификации проветривания тупиковых горных выработок [76, 95]. В этом случае способ рециркуляционного проветривания рассматривался и решал задачу интенсификации проветривания отдельных тупиковых выработок или призабойных зон и не влиял на общерудничные показатели проветривания.

В работе Jean-Paul Saindon [103] рассмотрены и проанализированы различные типы рециркуляции – от отдельных тупиковых горных выработок до схем общешахтной рециркуляции, однако проведенные исследования носят частный характер и больше направлены на анализ источников газовой выделенности и накопления газовых примесей различного характера, а также на исследование динамики аэрозольного состава воздуха. Также существенное внимание уделено системам контроля воздуха при применении рециркуляции для различных схем проветривания и систем разработки.

В работе McPherson [95] выполнен анализ оригинальных схем рециркуляционного проветривания, рассмотрены варианты размещения рециркуляционной установки в сбойке или в общей исходящей вентиляционной струе.

Целый ряд работ посвящен применению рециркуляционного проветривания для улучшения микроклиматических условий. При этом примечательно, что впервые рециркуляционное проветривание было применено на угольных шахтах для увеличения охлаждающей способности воздушного потока за счет интенсификации проветривания рабочих зон [91]. Зайцевым А.В. предложен оригинальный способ снижения температуры воздуха за счет организации участкового рециркуляционного проветривания и увеличения за счет этого общего объема воздуха для ассимиляции техногенных тепловыделений в рабочих зонах с последующим охлаждением исходящей струи окружающим массивом горных пород [9]. В работах S. Bluhm [77] предложено применение рециркуляции в рамках комплексных систем регулирования теплового режима при ведении горных работ в условиях нагретого массива горных пород и повышенных температур воздуха. Исследователями S. Bluhm и R. Ramsden [78, 102] учитывалось применение контролируемой рециркуляции и влияние рециркуляционных систем на снижение мощности систем охлаждения при разработке сверхглубоких рудников.

Исследования Воронова Е.Т. [6] показывают эффективность применения рециркуляции для нормализации микроклиматических условий и борьбы с обледенением на рудниках севера с учетом предварительной очистки повторно используемого воздуха от рудничной пыли, указывается отсутствие риска непрерывного нарастания концентрации пыли и повышение эффективности проветривания, однако газовый фактор не рассматривался.

С точки зрения рециркуляции и микроклиматических параметров также следует отметить, что в вентиляции калийных рудников рециркуляция широко себя зарекомендовала как действенный способ осушения главных воздухоподающих выработок. Данный эффект основан на том, что соляной массив представляет собой гигроскопичную среду, при движении по которой влажный воздух осушается и его дальнейшая подача и смешивание с потоком свежего воздуха исключают проблемы выпадения значительного количества конденсируемой влаги на главных воздухоподающих выработках в теплый период года [10,14]. Кроме того, предложен вариант применения общешахтной рециркуляции для снижения объема подогреваемого воздуха в холодный период года.

Аналогично можно отметить и зарубежный опыт в этом направлении. Современные темпы роста добычи полезных ископаемых приводят к тому, что главные вентиляторные установки и системы воздухоподготовки не справляются с непрерывно нарастающими нагрузками и зачастую требуется их реконструкция или полная замена, что является дорогостоящим мероприятием. Применение рециркуляционного проветривания позволяет избежать замены оборудования, это подтверждается результатами исследований, приведенных в статье L.Van den Berg [107], где указано, что с развитием горных работ главные вентиляторные установки и системы охлаждения не справляются с нарастающими мощностями и применение рециркуляции в комплексе с системами очистки является мощным инструментом поддержания качества вентиляции без дорогостоящей замены ГВУ. В последнее время довольно широко рециркуляционные системы проветривания рудников применяются в Канаде и Северной Америке с целью подогрева поступающего в шахту воздуха или его охлаждения в глубоких рудниках ЮАР и Южной Америки [73,77,91,79]. При этом в большинстве случаев применение систем рециркуляции для улучшения микроклиматических условий является не основным способом, а вспомогательным, комплексно дополняющим основные горнотехнические и теплотехнические мероприятия по управлению тепловым режимом горного предприятия.

Не смотря на то, что возможность использования систем частичного повторного использования воздуха доказана и обоснована и их применение на калийных рудниках

до недавнего времени было разрешено правилами безопасности [65], в настоящее время пункты правил, регламентирующие применение рециркуляции, отсутствуют. Схожая ситуация описана в работе индийских ученых [98], где указано, что нормативными документами запрещено применение рециркуляционного проветривания, однако исследования показывают, что применение контролируемой рециркуляции безопасно и эффективно.

В исследованиях по рециркуляции особое внимание уделяется вопросу безопасности применения рециркуляционных систем. В работах [69, 61] рассматривается система проветривания, которая содержит главную вентиляторную установку, рециркуляционную установку, ветвь утечек и рабочую зону. Из-за сложности аналитического расчета данной схемы выполняется численный расчет и определяются параметры безопасного применения рециркуляционных систем. Также описывается эффект «рециркуляционного запираания», когда напор ГВУ, приходящийся на рециркуляционный контур, уравнивается напором рециркуляционной установки, в этом случае поступление свежего воздуха прекращается и возникает стопроцентная рециркуляция, что при определенной мощности источника газовой выделений приводит к аварийной ситуации. В [69, 61] аспект безопасности применения рециркуляции рассматривается на численном примере, где приведены расчеты для одного набора исходных данных упрощенного участка вентиляционной сети, также в расчетной схеме кроме рабочей зоны не учитывается сопротивление других выработок, находящихся внутри рециркуляционного контура. В [43] рассматривается повышение безопасности проветривания в случае, если рециркуляционная система входит в состав системы автоматизированного управления проветриванием и в основном описываются требования к средствам автоматизации, а не к рециркуляционным установкам.

Следует отметить, что классическим приемом регулирования потоков для обеспечения рабочих зон требуемым количеством воздуха является использование средств отрицательного регулирования – перемычек, а также всевозможное снижение утечек. Это позволяет увеличить расход воздуха там, где его недостаточно, но если нормализовать ситуацию не удастся, то для перераспределения воздушных потоков используются средства положительного регулирования – вентиляторы различных типов. Характерной особенностью использования таких локальных источников тяги является отсутствие их влияния на глобальную подачу воздуха в рудник по воздухоподающим стволам, осуществляемую главной вентиляционной установкой (ГВУ), в этих условиях неизбежно возникает неконтролируемая рециркуляция, выступающая лишь средством увеличения

расхода воздуха, подаваемого в необходимую нам рабочую зону, а влияние рециркуляции на проветривание других рабочих зон и на утечки воздуха зависит от масштаба вовлечения этих процессов в рециркуляцию. В работах [85, 104] подчеркивается вред неконтролируемой рециркуляции и рассматриваются механизмы поиска рециркуляционных контуров с целью их дальнейшего исключения. В связи с этим следует дополнительно рассмотреть условия безопасности применения рециркуляции с учетом всех параметров и особенностей систем проветривания.

Несмотря на значительный объем проведенных исследований в области вентиляции рудников с учетом рециркуляционного проветривания, в отечественной практике оно нашло системное применение лишь для условий калийных рудников, чему во многом способствовали исследования по сорбции газов в них. За рубежом рециркуляционное проветривание нашло более широкое распространение, что является косвенным подтверждением целесообразности рассмотрения данного способа как перспективного на рудниках различных типов и выполнения исследований не только на калийных рудниках нашей страны. Поэтому важным является развитие общей методологии организации рециркуляционного проветривания в многосвязных системах горных выработок без строгой привязки к типу рудника.

## **1.2. Изучение динамики газового состава рудничной атмосферы**

Большинство технологических процессов на горных предприятиях сопровождается выделением горючих и ядовитых газов. Выделение вредных веществ происходит в процессе отбойки, транспортировки и перегрузки горной массы. В процессе добычи происходит разрушение массива горных пород механизированным или буровзрывным способом, в результате чего происходит выделение газов от взрывных работ и газов, содержащихся в массиве. Отгрузка полезного ископаемого и транспортировка горной массы осуществляется посредством конвейерных линий или машинами с ДВС, что также приводит к выделению газов, образующихся при работе двигателей или остаточному газовыделению с поверхности транспортируемого полезного ископаемого по пути движения по горным выработкам и в пунктах перегрузки.

Действие всех источников газовой выделености обеспечивает формирование газового состава рудничного воздуха в забое, рабочих зонах, на добычных участках и в целом по руднику. Места расположения, тип и характер действия источников газовой выделености зависят от свойств горных пород (газоносность, склонность к окислению), способа разрушения массива (буровзрывной или комбайновый), а также типа применяемого

оборудования. Мощности газовыделения напрямую зависят от производительности применяемых машин с двигателями внутреннего сгорания и комбайновых комплексов, а также газовой природы применяемых взрывчатых веществ. Все выделяемые при добыче и других процессах вредности можно представить в виде схемы, приведенной на рисунке 1.1.

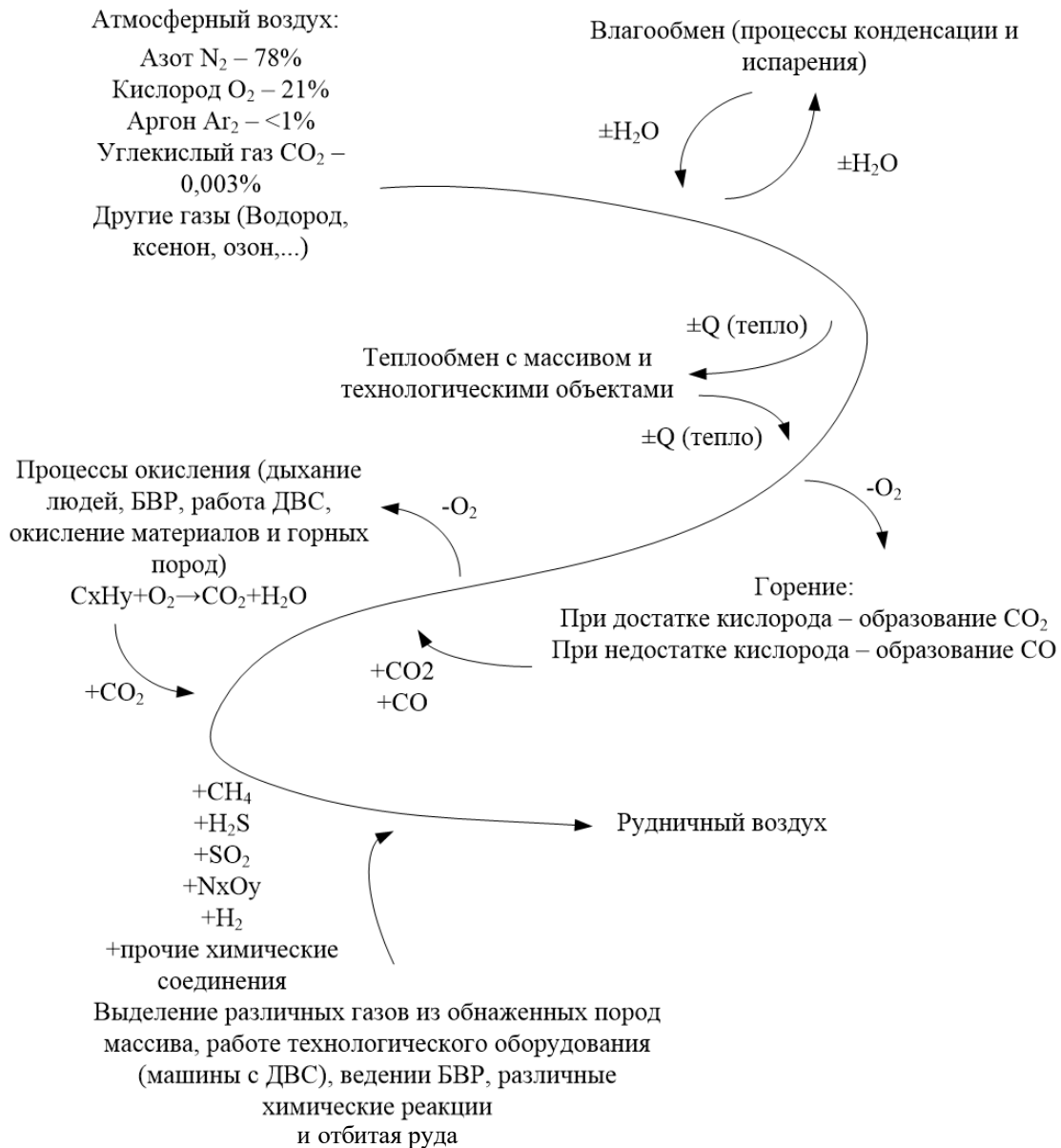


Рисунок 1.1 — Динамика изменения воздуха при движении по горным выработкам

Исследования вопроса газового состава рудничной атмосферы описаны в трудах таких российских ученых, как И.И.Медведев, А.Е. Красноштейн, К.З. Ушаков, А.А.Скочинский и др. [39, 54, 59] и зарубежных ученых Brake D.J. и McPherson M.J. [76, 93, 94]. Результаты исследований легли в основу современной нормативной базы, где, в том числе, указаны величины предельно допустимых концентраций газов, входящих в состав рудничного воздуха.



На сегодняшний день требования к газовому составу рудничной атмосферы по предельно-допустимому содержанию вредных компонентов приведены в пункте №151 «Правил безопасности при ведении горных работ ...» [66]:

«Содержание кислорода в воздухе выработок, в которых находятся или могут находиться люди, должно составлять не менее 20% (по объему). Содержание углекислого газа в рудничном воздухе не должно превышать на рабочих местах 0,5%, в выработках с общей исходящей струей шахты - 0,75%, а при проведении и восстановлении выработок по завалу - 1%. Суммарное содержание горючих газов метана и водорода в выработках не должно превышать 0,5% по объему (10% - нижней концентрации предела взрываемости, НКПР). Содержание водорода в зарядных камерах не должно превышать 0,5%, а содержание метана на объектах, на которых установлен «газовый режим», - 1%. Допустимые концентрации ядовитых газов, в соответствии с [66] приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Предельно-допустимые концентрации ядовитых газов в рудничном воздухе

Название	Формула	Предельно-допустимая концентрация	
		%	мг/м <sup>3</sup>
Метан	CH <sub>4</sub>	0,5	—
Оксид углерода	CO	0,0017	20
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	0,5	—
Оксиды азота	NO <sub>x</sub>	0,00026	5
Сернистый газ	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
Аммиак	NH <sub>3</sub>	0,0025	20
Углеводороды алифатические (C1-C10)	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	-	300

На протяжении многих лет основным критерием безопасности было и остается разбавление газовых примесей до концентраций, не превышающих допустимых значений путем подачи достаточного количества свежего воздуха. Исследования подтверждают, что в большинстве случаев концентрации газовых примесей на исходящей струе значительно ниже предельно-допустимых значений, краткие выкладки исследований газового состава воздуха по пути его движения через рабочие зоны от воздухоподающего ствола до вентиляционного приведены в [58].

С точки зрения изучения динамики газового состава рудничного воздуха из последних работ можно выделить исследования Казакова Б.П. и Левина Л.Ю. Также можно выделить работы Пучкова Л.А., направленные на разработку автоматических систем вентиляции забоев угольных шахт, в том числе предусматривающих динамическое управление проветриванием и изменение подачи воздуха в зависимости от изменения метановыделения участка. Однако данные работы не имели направленности на анализ возможности применения рециркуляционного проветривания. Тогда как в работе Hall A.E., McNaina D.M. и Hardcastle S. [87] приведены натурные исследования по качеству воздуха на исходящей струе и результат исследований подтверждает возможность использования контролируемой рециркуляции.

В работе [21] предлагается подход к оценке качества проветривания с точки зрения содержания вредных компонентов в рудничном воздухе и выполняется расчет коэффициента запаса воздуха, который учитывает качество воздуха на исходящей струе. Впоследствии авторы выполняют комплексную оценку с применением критерия эффективности на основании таких показателей, как качество и трудность проветривания, где трудность определяется топологическими особенностями вентиляционной сети.

Следует отметить, что большинство выполненных исследований газового состава рудничной атмосферы касается вопросов определения компонентного состава непосредственно в рабочих зонах и местах ведения горных работ, а процесс изменения газового состава воздуха на исходящей струе и его нестационарный характер исследован в меньшей степени. Вероятно, во многом данные исследования ограничивались возможностями измерительного оборудования и методической базы. Современные приборы для анализа газового состава позволяют выполнять измерения практически всех нормируемых компонентов в течение заданного промежутка времени.

В то же время, с точки зрения рециркуляционного проветривания принципиально важным является исследование факторов, определяющих концентрации газов на исходящей струе воздуха, что позволяет сделать вывод о возможности его повторного использования. При этом исследование должно включать измерение компонентного состава, анализ нестационарной динамики концентраций газов и оценку факторов, определяющих эту динамику (утечки воздуха, коэффициенты запаса и так далее).

### **1.3. Математические модели газораспределения в горных выработках**

С учетом важности вопросов расчета распределения примесей в атмосфере горных выработок как в штатных, так и в аварийных режимах, в данном направлении

выполнен значительный объем исследований. Общая методология расчета переноса вредных примесей в горных выработках сформулирована в середине XX века преимущественно для угольных шахт [24], где проблема выделения и переноса газов более актуальна по сравнению с рудниками. Методология расчета динамики вредных примесей на калийных рудниках разработана позднее — в 90-е годы XX в. [29]. В [3] сделан подробный обзор моделей и методов расчета переноса вредных примесей в шахтах и рудниках произвольного типа, также приведены некоторые аспекты сетевого расчета распределения вредных примесей, где представлена формула расчета концентрации примеси при смешивании потоков в сопряжениях горных выработок произвольного типа.

Разработанные модели газораспределения в сети горных выработок определяются спецификой решаемых задач и в целом их можно поделить на следующие большие группы:

1. Модели, позволяющие рассчитывать распределение газа в отдельных ограниченных горных выработках или их участках.
2. Сетевые модели, позволяющие рассчитывать распределение газа в сети горных выработок.

Первая группа моделей строится на применении известных физических законов распространения газовых примесей. В целом выделяют два основных механизма распространения газовой примеси в объеме исследуемой горной выработки – конвективный, связанный с переносом самой среды, и диффузионный, связанный с распространением газа внутри среды. В общем случае реализуются все механизмы газопереноса, однако в зависимости от типа исследуемого объекта (выработки) и рассматриваемого процесса возможен выход того или иного механизма на определяющую позицию. На основе этого различными исследователями было предложено множество моделей расчета газораспределения в горных выработках, из которых можно выделить следующие основные.

Для камер и камерообразных выработок, которые имеют близкие по величине ширину и длину, применяется балансовая модель массы, приводящая к уравнению относительно средней концентрации в камере  $\bar{c}$  вида [5,59,60]:

$$\frac{d\bar{c}(t)}{dt} + \frac{Q \cdot K_T}{V} \cdot \bar{c}(t) = \frac{J(t)}{V} + \frac{Q \cdot K_T}{V} \cdot c_0, \quad (1.1)$$

где  $Q$  – расход воздуха, подаваемого на проветривание,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $K_T$  – коэффициент турбулентной диффузии (по Воронину В.Н.), характеризующий интенсивность выноса примеси из объема и определяющийся в основном аэродинамикой проветривания;  $V$  – проветриваемый объем,  $\text{м}^3$ ;  $J(t)$  – функция источника газовыделения в объеме,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $c_0$  – начальная средняя концентрация в объеме,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ . Такое обыкновенное

дифференциальное уравнение в большинстве случаев решается аналитически и является основой множества моделей по проветриванию тупиковых горных выработок и призабойных пространств.

Красноштейном А.Е. исследовалась аэрогазодинамика очистных камер калийных рудников с большим сечением (до и свыше  $100 \text{ м}^2$ ), для которых было установлено важное значение диффузионного газопереноса и обосновано применение уравнения конвективно-диффузионного переноса вида [27]:

$$\frac{\partial c(x, t)}{\partial t} + u \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c(x, t)}{\partial x^2}, x \in (0; L), t > 0 \quad (1.2)$$

со следующими краевыми и начальными условиями:

$$\left[ -D \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} + u \cdot c(x, t) \right]_{x=0} = u \cdot c(0, t); \left[ -D \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} + u \cdot c(x, t) \right]_{x=L} = u \cdot c(L, t); c(x, 0) = c_0(x).$$

В представленной системе уравнений  $c(x, t)$  – нестационарное распределение усредненной по сечению концентрации газа по длине камеры;  $u$  – средняя скорость течения воздуха по камере, м/с;  $D$  – коэффициент продольной диффузии газа вдоль камеры.

На основе изучения закономерностей формирования круглых и плоских струй в камерах с учетом различных скоростей диффузии вдоль и поперек выработок Лайгна К.Ю. выполнено исследование для очистных камер сланцевых рудников с использованием следующего уравнения [34]:

$$\frac{\partial c(x, y, t)}{\partial t} + u \frac{\partial c(x, y, t)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 c(x, y, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c(x, y, t)}{\partial y^2}. \quad (1.3)$$

В этом уравнении помимо продольной диффузии газа с коэффициентом  $D_x$  учитывается поперечная  $D_y$ . Данное уравнение также имеет приближенные решения.

На основе представленных выше моделей разрабатывались более сложные, дополнительно учитывающие притоки воздуха за счет утечек и наличие распределенных источников выделения и поглощения газов, модели газопереноса [1]. Как правило, поглощение газов учитывало химические реакции превращения газов (например, окисление оксида азота в выхлопных газах или после проведения взрывных работ) или растворение газов в воде [27,31,71,72].

Надо отметить, что представленные модели газопереноса в выработках базируются на основе известного поля скоростей и не учитывают влияния газовой примеси на распределение воздушных потоков. В то же время, при суфлярных выделениях метана или выбросах нагретых выхлопных газов от двигателей внутреннего сгорания может

возникать явление естественной конвекции, существенно влияющей на поле скоростей. В связи с этим для исследований процессов распределения газа в горных выработках с учетом всей сложности и многообразия протекающих процессов, геометрии горных выработок и оборудования на сегодняшний день применяются методы вычислительной гидродинамики (CFD), реализованные в ряде программных комплексов, таких как ANSYS, COMSOL и других [24,42,79,82,84].

Модели первой группы используются в основном для определения способов и параметров местного проветривания выработок, то есть управления параметрами атмосферы внутри отдельных горных выработок или даже отдельного участка (например, призабойной зоны), как в работе [92] приведены результаты исследований газовой динамики в длинных очистных забоях, находящихся в рециркуляционном контуре. И несмотря на то, что возможности CFD моделирования позволяют решать задачи любой сложности, с точки зрения моделирования их применение ограничено возможностями вычислительной техники и для решения сетевых задач они практически не пригодны, особенно если принять во внимание сложность топологии и общую протяженность горных выработок современных шахт и рудников.

Поэтому рассмотрим вторую выделенную группу математических моделей для расчета распределения газов в сети горных выработок. Следует отметить, что с точки зрения математического моделирования и реализации решения вторая группа зачастую сложнее и требует применения численных методов, а также определенного минимального объема вычислительных ресурсов, поэтому эти модели получили активное применение и развитие только с 90-х годов прошлого века.

Различные аспекты сетевого подхода к решению задач аэрогазодинамики рассматривались в работах Московского горного, Донецкого и Пермского политехнических институтов, Института геотехнической механики АН УССР, Института горного дела АН КазССР, ВостНИИ, а также других советских и зарубежных институтов и организаций [1,22,23,28,33,70]. В основном все подходы представляли собой сильно упрощенные балансовые модели с возможностью последовательного расчета концентраций в сети по трактам движения воздуха или составлению узловых уравнений газовых балансов при фиксированном стационарном воздухораспределении. В частности, Клебановым Ф.С. исследована газовая статика и динамика переходных процессов в параллельных соединениях, являющихся идеализированной граф-схемой выемочного участка [22]. В работе [41] предложен метод, основанный на так называемой «матрице газораспределения», учитывающей взаимовлияние выделения газа в различных ветвях сети. Наиболее

обстоятельно задача расчета стационарного распределения концентрации примеси в шахтной вентиляционной сети рассмотрена Цоем С. [68]. В этой работе рассматриваются общие принципы и алгоритмы определения газового состояния шахтной вентиляционной сети на основе моделирования газового баланса в узлах модели вентиляционной сети с учетом изменения концентрации газов в ветвях за счет наличия источников газовой выделенности.

Все эти методы обладали определенной применимостью для расчета установившегося газораспределения, но они были пригодны только для стационарных и квазистационарных процессов с невозможностью расчета при наличии рециркуляционных контуров.

В работах того периода особое место можно выделить диффузионно-сетевым методам расчета процессов газораспределения, разработанным Файнбургом Г.З. и Красноштейном А.Е. [29]. Данные методы базировались на оригинальной идее применения решений уравнений конвективно-диффузионного переноса газовых примесей для решения задачи стационарного и нестационарного газораспределения не только в отдельных выработках, но и во всей сети.

Однако методы расчета газораспределения в рудничных вентиляционных сетях получили развитие в 90-х годах, в связи с развитием вычислительной техники и методов компьютерного моделирования. Начиная с этого периода активно развиваются методы расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях, на основе которых разрабатываются модели расчета газо- и теплораспределения. В работе Круглова Ю.В. [32] приведен анализ существующих моделей и методов расчета стационарного воздухораспределения и разработан алгоритм расчета нестационарного воздухораспределения с точки зрения систем оптимального управления проветриванием, указывается, что разработанный алгоритм подходит для расчета газораспределения.

На сегодняшний день большинство современных программно-вычислительных комплексов, получивших широкое распространение на горных предприятиях, имеют возможности расчета распределения газовых примесей. Среди зарубежных комплексов можно выделить программы Ventsim и VUMA, среди отечественных – АэроСеть и Вентиляция 2.0., однако возможности расчета распределения газов ограничиваются наиболее простой моделью конвективного переноса на основе рассчитываемого распределения расходов и направлены прежде всего на прогнозирование распределения продуктов горения при авариях. В работах Шалимова А.В. [69] и Кормщицова Д.С. [26]

обосновывается применение моделей идеального вытеснения для расчета зон задымления при пожарах.

Зачастую ограничение рассмотрения только конвективной составляющей при решении задач газораспределения связано с тем, что при учете всех факторов численная схема существенно усложняется, так как пространственные дискретизации для расчета процессов конвективного и диффузионного переносов существенно отличаются. В связи с этим учет продольной диффузии в сетевой постановке усложняет расчет. Однако, как будет показано далее, на основе результатов экспериментальных исследований, диффузионные процессы оказывают существенное влияние на газораспределение даже в штатных режимах проветривания, когда в выработках наблюдаются незначительные градиенты концентраций газов.

Многие труды посвящены исследованиям диффузионного переноса и величины коэффициента продольной дисперсии (диффузии) [3,7,90], при этом некоторые исследователи ограничивались лишь общими фразами о газодинамическом расчете [109], а в [74 и 110] коэффициент продольной дисперсии использовался в основном для анализа применимости метода трассировки газов в вентиляции шахт.

Решение задачи о распределении вредных примесей в сети горных выработок разных аэродинамических типов (штрекообразные, камерообразные выработки, сопряжения выработок) требует своих моделей массопереноса. Наиболее проработанная система таких моделей, учитывающая процессы адвективного/конвективного переноса и турбулентного перемешивания/диффузии, была предложена в Перми в работах Г.З.Файнбурга и монографически изложена в работе А.Е. Красноштейна и Г.З.Файнбурга [29].

Эта теория опирается на естественное для горного дела деление подземных горных выработок на собственно выработки (отображаемые дугами орграфа или ветвями вентиляционной сети) и на места их сопряжения (отображаемые вершинами орграфа или узлами вентиляционной сети). Каждому такому математическому объекту ставится в соответствие та или иная математическая модель [64], основные уравнения массопереноса приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 — Уравнения процессов массопереноса в ветвях и узлах вентиляционной сети

Элемент сети	Геометрия выработки	Искомая переменная	Модель переноса	Вид уравнения	Дополнительные условия
Ветвь	Протяженные выработки $L \gg \sqrt{S}$	Распределенные параметры $C(x, t)$	Диффузии	$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + f - K \frac{P}{S} (C - C_*)$	$x \in [0, L]$
			Дисперсии	$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + f - K \frac{P}{S} (C - C_*)$	$x \in [0, \infty)$ $C(\infty) \leq \infty$
			Вытеснения	$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = f - K \frac{P}{S} (C - C_*)$	$x \in [0, \infty)$
	Короткие выработки $L \sim \sqrt{S}$	Сосредоточенные параметры $C(t)$	Смешивания	$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{Q}{V} (C^+ - C^-) + \frac{I}{V} - K \frac{\Pi}{V} (C - C_*)$	$C^- = (1 - k)C^+ + kC$
Узел	Инерционный узел конечного объема $V_u \sim V_v$	Сосредоточенные параметры $C(t)$	Смешивания	$V \frac{\partial C}{\partial t} = \sum_+ J^+ - \sum_- J^- + 1 - КП(C - C_*)$	$C_v^- = (1 - k_v)C^+ + k_v C$
	Безынерционный точечный узел $V_u \ll V_v$	Сосредоточенные параметры $C(t)$	Идеального смешивания	$\sum_+ J^+ - \sum_- J^- = 1$	$\forall C_v^- = C$

Решение представленных систем дифференциальных уравнений в обыкновенных (по времени) или в частных производных (по времени и по пространству) однозначно конкретизируется начальными и граничными условиями, которые для краевой задачи, определенной на орграфе, могут быть поставлены в его узлах. Значение концентрации в узле  $C_u(t)$  задается при постановке граничных условий первого рода.



Проектирование современных шахт и рудников, имеющих сложные вентиляционные сети, состоящие из множества горных выработок и источников тяги [38], требует применения современных вычислительных методов и средств для расчета распределения расходов воздуха, а также других важных характеристик воздушного потока — температуры, влажности, концентрации различных примесей [25]. Важность определения распределений примесей обусловлена действующими на территории РФ «Правилами безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», в которых предполагается расчет времени эвакуации работников при аварии на рабочих местах. В случае сложных разветвленных вентиляционных сетей корректный расчет эвакуации работников с учетом наличия пожара или других источников выделения газа требует моделирования нестационарного распределения вредных примесей (наряду с расчетом переноса теплоты). На шахтах и рудниках с «газовым режимом» необходимо разрабатывать мероприятия по разгазированию горных выработок, что также требует выполнения расчетов выноса вредных примесей из рабочих зон по системе горных выработок. Поэтому учет диффузии при расчете распространения газовых примесей в горных выработках является важной и актуальной задачей.

Несмотря на большой объем выполненных исследований некоторые вопросы в области расчета распределения вредных примесей остаются недостаточно изученными. Исследователями рассматривались отдельные горные выработки, а вопрос выбора коэффициента продольной дисперсии применительно к сетевым расчетам распределения вредных примесей в вентиляционных сетях шахт и рудников нигде подробно не обсуждался. Не затрагивался и вопрос о влиянии скоростей воздушного потока в смежных горных выработках на эффективный коэффициент дисперсии (диффузии) в рассматриваемой выработке. Поэтому необходимо разработать расчетную формулу для определения эффективного коэффициента продольной дисперсии с учетом влияния скоростей воздушного потока в соседних горных выработках с целью применения его для расчета газораспределения в горных выработках в сетевой постановке.

Кроме того, требуется выполнить численную и программную реализацию расчета газораспределения в сети выработок различного типа с учетом механизмов конвективного и диффузионного переноса для возможности прогнозирования газовой обстановки и расчета параметров частичного повторного использования воздуха.

#### **1.4. Существующие подходы к расчету и организации рециркуляционного проветривания**

Эффективность рециркуляционных систем подтверждается многолетним опытом применения на рудниках России и Республики Беларусь, имеются также сведения об использовании рециркуляционных систем на рудниках Великобритании [75], которые также показали повышение эффективности проветривания и безопасности для рабочих. Так как при применении рециркуляции часть отработанного воздуха подается на свежую струю появляется возможность снижения количества воздуха, подаваемого с поверхности [32,40], это позволяет исключить подготовку и подачу дополнительных объемов воздуха и существенно снизить энергетические затраты на проветривание [16,17,32,81]. При этом за время эксплуатации систем не зафиксировано ни одной аварийной ситуации, связанной с применением рециркуляции.

Основными вопросами, возникающими при расчете и применении рециркуляционных систем, является определение места размещения рециркуляционной установки и количества повторно используемого воздуха.

Основная идея выбора места размещения рециркуляционной установки может заключаться в определении таких типовых схемных решений организации рециркуляционного проветривания, которые бы позволяли максимально снизить утечки воздуха с одновременным их перенаправлением, либо в рабочую зону, либо для подсвеживания исходящей из рабочей зоны струи, на основе детального расчета процессов распространения газовых примесей в сети горных выработок произвольной топологии с учетом ее аэродинамических параметров.

В работах [45,46] приведены результаты исследований по определению оптимального места размещения рециркуляционной установки с точки зрения энергоэффективности, однако данные решения справедливы лишь для приведенных численных примеров с фиксированным коэффициентом рециркуляции и длиной горизонта до 2000 метров. В работе сделан вывод, что суммарное энергопотребление зависит от расстояния между рециркуляционной сбойкой и забоем, однако расстояние от вскрывающих выработок до рециркуляционной сбойки не учитывается.

Для определения количества повторно используемого воздуха и требуемого количества воздуха для проветривания рудников при применении рециркуляции разрабатываются методики расчета, учитывающие специфику ведения горных работ на предприятиях. Одной из таких методик является действующая инструкция по расчету количества воздуха для рудников ОАО «Беларуськалий» [13], где применение

рециркуляционных систем разрешено «Правилами промышленной безопасности...» [48] и используется на всех рудниках объединения. Основой для определения максимального количества повторно используемого воздуха является количество воздуха, необходимое для проветривания забоя по газовому фактору, которое определяется путем вычитания из количества воздуха по определяющему фактору величины расхода воздуха по газовому фактору с учетом коэффициента утечек в трубопроводе по формуле:

$$Q_{pz}^{pec} = \sum K_y (Q_z - Q_z^r), \quad (1.4)$$

где  $\sum Q_{pz}^{pec}$  — сумма количества рециркуляционного воздуха для проветривания всех рабочих зон (тупиковых забоев, лав и др.), м<sup>3</sup>/мин;  $Q_z$  — количество воздуха для проветривания отдельных забоев, м<sup>3</sup>/мин;  $Q_{yp}$  — количество воздуха, необходимое для ассимиляции газовыделений в отдельных забоях, м<sup>3</sup>/мин.

Количество рециркуляционного воздуха для главного направления (крыла) определяется по формуле:

$$Q_n^{pec} = \sum Q_n^{pec} + Q_{yглн}, \quad (1.5)$$

где  $\sum Q_n^{pec}$  — сумма расходов рециркуляционного воздуха на панелях (блоках), м<sup>3</sup>/мин;  $Q_{yглн}$  — суммарные утечки воздуха через вентиляционные сооружения на главном направлении (кроме утечек в блоках и панелях), м<sup>3</sup>/мин.

Аналогичный принцип расчета прослеживается и для других участков шахтного поля, при этом в «Инструкции...» [13] указано, что при расчете производительности рециркуляционной установки учитываются утечки воздуха только внутри рециркуляционного контура, а предел повторно используемого воздуха на действующих рудниках ограничен технической производительностью рециркуляционной установки и величиной требуемого расхода воздуха по газовому фактору без учета фактических концентраций газа на исходящей струе. Также отмечается, что для расчета производительности рециркуляционной установки на проектируемых рудниках следует использовать специализированное программное обеспечение АК «АэроСеть».

На рудниках России в настоящее время использование рециркуляционного проветривания запрещено «Федеральными нормами и правилами...» [66], однако в предыдущих редакциях «Правил безопасности...» [8,65] применение рециркуляции на калийных рудниках допускалось и регламентировалось отдельными пунктами, где указывались условия безопасной эксплуатации рециркуляционных систем. Наиболее широкое распространение частичное повторное использование воздуха получило на калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей, где для условий ПАО «Уралкалий» разработана инструкция по расчету количества воздуха с учетом применения

рециркуляции [55]. В соответствии с инструкцией количество повторно используемого воздуха  $Q_{\text{повт}}$  (производительность рециркуляционной установки) определяется по формуле:

$$Q_{\text{повт}} = Q^p K_p, \quad (1.6)$$

где  $Q^p$  — определяется как суммарное расчетное количество воздуха, необходимое для проветривания участка вентиляционной сети без применения схем рециркуляционного проветривания;  $K_p$  — коэффициент повторного использования воздуха (коэффициент рециркуляции), определяемый по формуле:

$$K_p = \varepsilon \frac{C_{\text{доп}}}{C_{\text{повт}}}, \quad (1.7)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент, зависящий от нормируемого параметра. Согласно требований п. 208 [65] он составляет 0,3 для ядовитых газов и 0,1 для горючих газов;  $C_{\text{повт}}$  — концентрация ядовитых газов (СО, Н<sub>2</sub>S), горючих и взрывоопасных газов (СН<sub>4</sub>, Н<sub>2</sub>), замеренная на исходящих струях в месте расположения рециркуляционной установки, объем % (%НКПР);  $C_{\text{доп}}$  — предельно допустимая концентрации ядовитых и взрывоопасных газов, объем % (%НКПР). К дальнейшему расчету принимается наименьшее значение из рассчитанных для контролируемых горючих и ядовитых газов.

Количество свежего воздуха, подаваемое в контур рециркуляции  $Q_{\text{св}}$  определяется по формуле:

$$Q_{\text{св}} = Q^p - Q_{\text{повт}}. \quad (1.8)$$

При этом количество воздуха, используемого повторно  $Q_{\text{повт}}$  не должно превышать фактической производительности рециркуляционной установки.

Количество воздуха, необходимое для проветривания крыла (направления) шахтного поля, при наличии участков вентиляционной сети, проветриваемых с применением рециркуляционных схем, (с учетом расчетного количества свежего воздуха, подаваемого в контур рециркуляции), определяется по формуле:

$$Q_{\text{кр}} = K_3 (\Sigma Q + \Sigma Q_{\text{св}}), \quad (1.9)$$

где  $\Sigma Q$  — суммарное расчетное количество свежего воздуха для всех участков вентиляционной сети, расположенных вне контура рециркуляционного проветривания, м<sup>3</sup>/мин;  $\Sigma Q_{\text{св}}$  — суммарное количество свежего воздуха для всех участков вентиляционной сети, проветриваемых с использованием рециркуляционного проветривания, м<sup>3</sup>/мин;  $K_3$  — коэффициент запаса, учитывающий утечки воздуха в крыле, находящемся вне зон рециркуляционного проветривания.

При использовании общекрыльевой рециркуляции, количество воздуха, необходимое для проветривания рудника (с учетом расчетного количества свежего воздуха, подаваемого в контур рециркуляции), определяется по формуле:

$$Q_p = K_3 (\sum Q_{кр} + \sum Q_{св}^{кр} + \sum Q_{кш}), \quad (1.10)$$

где  $Q_{кр}$  — количество воздуха, необходимое для проветривания крыльев шахтного поля, в которых отсутствует общекрыльевая рециркуляция (расположенных вне контура рециркуляционного проветривания), м<sup>3</sup>/мин;  $Q_{св}^{кр}$  — количество воздуха, необходимое для проветривания крыльев шахтного поля при применении общекрыльевой рециркуляции, м<sup>3</sup>/мин;  $Q_{кш}$  — количество воздуха, необходимое для проветривания камер служебного назначения рудника, м<sup>3</sup>/мин.

Согласно инструкции [55] по расчету количества воздуха для калийных рудников ПАО «Уралкалий» производительность рециркуляционной установки зависит от концентрации газов на исходящей струе. То есть количество повторно используемого воздуха определяется коэффициентом рециркуляции, величина которого в свою очередь зависит от концентрации горючих и ядовитых газов на исходящей струе, но максимально возможное значение ограничено 70% от расчетного количества свежего воздуха для проветривания участка. Количество повторно используемого воздуха напрямую не зависит от величины утечек воздуха внутри рециркуляционного контура и не ограничивается количеством воздуха, необходимым для подачи на добычные участки по газовому фактору.

Таким образом, в существующих методиках для рудников ОАО «Беларуськалий» и ПАО «Уралкалий» [13,55] при расчете количества повторно используемого воздуха учитывается количество вредных газов в исходящей струе и величина утечек воздуха на рассматриваемом участке. Но эти параметры учтены в данных методиках не в полной мере, при расчетах необходимо учитывать и качество воздуха на исходящей струе (по сути ненулевую концентрацию газов на свежей струе при применении рециркуляции) и величину утечек внутри рециркуляционного контура одновременно, так как это оказывает значительное влияние на безопасность применения рециркуляционных систем.

На сегодняшний день на практике применения рециркуляционного проветривания методики расчета требуемого количества воздуха предусматривают рециркуляцию только как фактор снижения количества воздуха, подаваемого на заданное направление, крыло или рудник в целом, не затрагивая рассмотрение участков внутри рециркуляционного контура. В частности, не рассматривается изменение параметров газовой обстановки в пределах отдельных рабочих зон, хотя очевидно, что наличие рециркуляции приводит к появлению начальной концентрации газов в воздухе, подаваемом на

проветривание рабочих зон. Вероятно, это требует корректировки параметров расчета не только вне рециркуляционного контура, но и внутри него.

Конечной целью любого проветривания на практике является поддержание допустимых показателей качества (т.е. показателей токсичности, взрывоопасности, радиационной безопасности и микроклимата) рудничной атмосферы. Для доведения этого общего требования до осуществляемых на практике мероприятий требуется знать конкретную величину допустимых показателей, а также в каких местах их нужно поддерживать и какие последствия могут наступить в случае возникновения нарушений.

Отсутствие приборов локального контроля и внутренняя логика администрирования привели нормативную документацию к требованию соблюдения ПДК во всем объеме горных выработок, а не только на рабочих местах и в рабочих зонах, т.е. там, где постоянно или временно (эпизодически или не более нескольких часов в смену) работают люди. Многолетняя практика и теоретические исследования не только в рамках парадигмы рудничной вентиляции, но и в сфере безопасности труда работающих и охраны труда работников приводят к обоснованному мнению, что такой подход избыточен и приводит к многочисленным противоречиям, затрудняющим внедрение рециркуляционного проветривания.

Из самого определения ПДК, как такой концентрации вредности, которую можно вдыхать на протяжении всей трудовой жизни в течение 40-часовой рабочей недели без каких-либо последствий для здоровья, следует возможность подачи в забой воздуха с ПДК. При этом в забое происходит выделение вредности, которую в составе загрязненного воздуха можно вытеснить воздухом с ПДК, что неизбежно вызывает превышение ПДК в исходящей струе и использование такого воздуха для рециркуляции нежелательно. Разбавление вредностей в рабочей зоне до ПДК требует подачи свежего воздуха с концентрациями ниже ПДК. Требования к качеству воздуха на свежей струе зависят от степени загрязнения и свойств загрязнителя, следовательно, чем ниже ПДК и чем больше объем загрязнителя, тем более свежего воздуха надо подавать только для разжижения.

Объем проветриваемой рудничной атмосферы, расход свежего воздуха и время проветривания (для процесса идеального вытеснения) связаны известной зависимостью:

$$\tau = \frac{V}{Q}, \quad (1.11)$$

где  $\tau$  – так называемая кратность обмена, показывающая сколько времени нужно подавать свежий воздух с расходом  $Q$  в объект проветривания, чтобы весь объем  $V$  использованного (и/или загрязненного) воздуха был заменен свежим (и/или более чистым).

До недавних пор, когда производительность отдельного рудника была относительно небольшой, мощности вентилятора главного проветривания и пропускной способности стволов хватало на организацию нормативно-требуемого проветривания. Сегодня, когда речь идет о резком росте производственной мощности рудников для вытеснения всего использованного воздуха свежим потребуется значительно больше времени. И остается решить вопрос о том, какой должен быть этот расход свежего воздуха, чтобы надежно обеспечить безопасность высокопроизводительного ведения работ. К таким ориентирам относятся понятия минимальной и максимальной допустимой скорости воздушного потока, применимые к одиночной горной выработке и к местонахождению персонала, однако они не снимают вопрос о качестве воздушной среды.

При этом считается, что содержание любых загрязнений однородно по объему воздушной среды всей горной выработки или ее выделенной части (например, призабойной части тупиковой выработки) и не должно превышать нормативных значений, в качестве которых для токсичных загрязнений принята предельно-допустимая концентрация (ПДК), а для взрывоопасных загрязнений – 10% доля нижнего концентрационного предела распространения пламени. Это приводит к тому, что для поддержания действенного и нормативного проветривания рабочей зоны нужно намного больше свежего воздуха по сравнению с объемами выделения загрязнений. Обратим внимание на то обстоятельство, что, если в рабочей зоне нужно поддерживать ПДК, то и в исходящей струе будет то же самое [62,63]. И возникает вопрос о том, почему такой воздух нельзя использовать повторно.

С позиции воздухораспределения расход по рециркуляционному контуру никак не зависит от расхода воздуха, поступающего в контур (и выходящего из него в силу закона сохранения массы), и определяется только возможностями вентилятора. Образно говоря, по контуру может крутиться любое количество воздуха, что способствует подаче большего количества воздуха в проветриваемую зону. Это существенно меняет динамику газовой обстановки. В стационарной ситуации уравнение газового баланса для всего контура можно записать в виде:

$$QC + qC = QC^+ + J^+ + qC, \quad (1.12)$$

где  $C$  – концентрация газа в проветриваемой рабочей зоне,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $Q$  – количество поступающего свежего воздуха,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $C^+$  – концентрация газа в поступающем воздухе,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $q$  – расход повторно используемого воздуха,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $J^+$  – суммарный дебит газовыделения,  $\text{м}^3/\text{мин}$ . После приведения подобных членов, связанных с

рециркуляционным потоком, приходим к уравнению, неотличимому от соответствующего уравнения для случая без рециркуляции:

$$QC = QC^+ + J^+, \quad (1.13)$$

откуда концентрация в проветриваемой рабочей зоне (и исходящей струе) равна  $C = C^+ + \frac{J^+}{Q}$  и при рециркуляции, и без неё и потребность в свежем воздухе при таком модельном рассмотрении равна потребности, необходимой для статического разжижения выделившейся в выработки рециркуляционного контура примеси. Для нестационарной ситуации с интенсивным газовыделением с обнаженных поверхностей породного массива и отбитой горной массы рециркуляция становится эффективной, так как рабочая зона проветривается не  $Q$  более чистого воздуха, чем воздух в рабочей зоне, а  $Q+q$ , что усиливает качество выноса вредных примесей.

В свою очередь при организации рециркуляции следует разграничивать нормальную штатную ситуацию, в рамках которой используется возврат части исходящей струи и аварийную ситуацию, в которой в общем случае рециркуляция может представлять опасность, что необходимо выявить на стадии её проектирования, и, наконец, ситуации с реверсом общешахтного проветривания, который принципиально меняет все воздухо-распределение, в том числе и в выработках, затронутых влиянием рециркуляции. Поскольку рециркуляция нужна только в нормальном штатном режиме, во всех иных ситуациях или при малейшем подозрении на отклонение от штатной ситуации, она должна быть автоматически отключена.

В реальности практически все процессы рециркуляционного проветривания, как и рудничного проветривания вообще, являются нестационарными. Важным для проектирования рециркуляционного проветривания является различие условно стационарной и нестационарной рециркуляции. Особенно существенен учет нестационарностей при проветривании забоя, рабочей зоны. Объекты проветривания типа рудника в целом, или его крупного фрагмента, традиционно рассматриваются как стационарно проветриваемые. Эти подходы необходимо применять и к рециркуляционному проветриванию, а для их учета необходимо использовать специальные подходы, которые состоят в выявлении пространственной структуры горных выработок и вентиляционных потоков, а также разделения процессов адвективного переноса (вытеснения) и вихревой диффузии (смешения). Анализ рециркуляционного проветривания показывает важность учета «конфигурации» воздушных потоков.



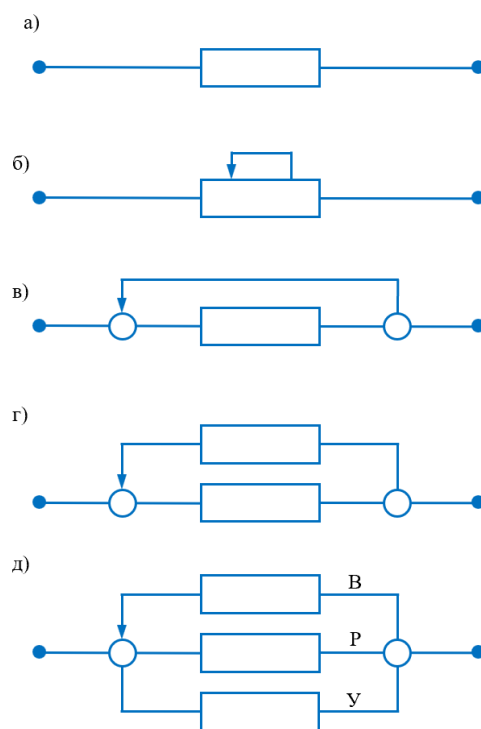


Рисунок 1.2 — Простейшие конфигурации потоков в рабочей зоне: а) бесструктурное изображение рабочей зоны, б) бесструктурное изображение рабочей зоны с рециркуляционным потоком, в) бесструктурное изображение рабочей зоны с мгновенно возвращаемым рециркуляционным потоком с выделением «точек» смешения, г) структурное изображение рабочей зоны с выделением рециркуляционной зоны (двухзонный контур) и выделением «точек» смешения и д) структурное изображение рабочей зоны с рециркуляционной зоной и зоной утечек, а также с выделением «точек» смешения

Обратим внимание, что выделение бесструктурной рабочей зоны (рисунок 1.2а и 1.2б) характерно для идеи поддержания ПДК во всем свободном пространстве рудничной атмосферы, такая зона описывается моделью смешения [64]. Схемы, приведенные на рисунке 1.2в, 1.2г и 1.2д позволяют четче определить новые возможности для однозонного и двухзонного контуров, а также с учетом зоны утечек соответственно.

Важным при организации рециркуляционного проветривания является рассмотрение внешних относительно объекта проветривания потоков (не входящих в рециркуляционный контур), и внутренних потоков (включающих рециркуляционный контур и объект проветривания), так как эффективность применения рециркуляции зависит от величины утечек воздуха в рециркуляционном контуре.

Классическим примером однозонного контура рециркуляции исходящих из тупикового забоя воздушных масс является рециркуляция в тупиковом забое, возникающая при нагнетательном проветривании струей свежего воздуха, выходящей из конца става вентиляционного трубопровода [36,37]. Когда в поле действия рециркуляции попадают не одна, а несколько выработок, разделение потоков на внешние и внутренние

становится трудноосуществимым и неоднозначным, но в любом случае, использовать однозональный подход становится невозможным и требуется четко использовать идеи многозональности, где все отработанные, действующие или проектируемые горные выработки разбиваются минимум на три зоны: проветриваемая, рециркуляционная и внешняя.

Проветриваемой зоной будем называть объект проветривания, нехватка подачи пригодного для проветривания воздуха в который потребовала использования рециркуляции. Проветриваемая зона может быть меньшей, равной, и даже большей, чем рабочая зона. Соотношение проветриваемой и рабочей зон не зависит от количества выработок, входящих в рабочую зону, и определяется только требованиями производства.

В общем случае каждая из таких зон имеет множество связующих их с другими зонами горных выработок, которые можно использовать как входы и выходы. Для удобства контроля за проветриванием в проветриваемой зоне целесообразно иметь только один вход (и соответственно один поток воздуха) в проветриваемую зону и один выход. Эта целесообразность усиливается требованием Правил безопасности [66], запрещающим проветривание через неконтролируемые зоны (например, завалы и обрушения), поэтому необходимо четко представлять, где идет свежая струя. Точку входа в проветриваемую зону свяжем с концом воздухоподающей выработки, а точку выхода с началом воздухоотводящей выработки (они могут иметь другие названия, в том числе и технологического характера).

Рециркуляционной зоной назовем все те выработки, по которым исходящий воздух возвращается в условно свежую струю. Желательно ввести точку отбора, характеризующую место отбора отработанного воздуха, и точку возврата, характеризующую точку возврата рециркуляционного потока в подаваемый в проветриваемую зону поток воздуха. Минимально рециркуляционная зона представляет собой одну выработку (выбранную из существующих или специально пройденную), в которую помещают вентилятор, с помощью которого организуют рециркуляционный контур, в который по определению входит рециркуляционная и проветриваемая зоны. У рециркуляционного контура также имеется две точки – входа свежей струи и выхода исходящей струи. Внешней зоной будем называть все выработки и их сопряжения, не вошедшие в рециркуляционный контур.

Рассмотрим с этих позиций для наглядности проветривание тупиковой выработки нагнетательным способом. На рисунке 1.3а приведено традиционное изображение этой ситуации, а на рисунке 1.3б – схема вентиляционных потоков и соответствующих зон, которые в данном случае меньше размеров выработок и рабочей зоны в целом.

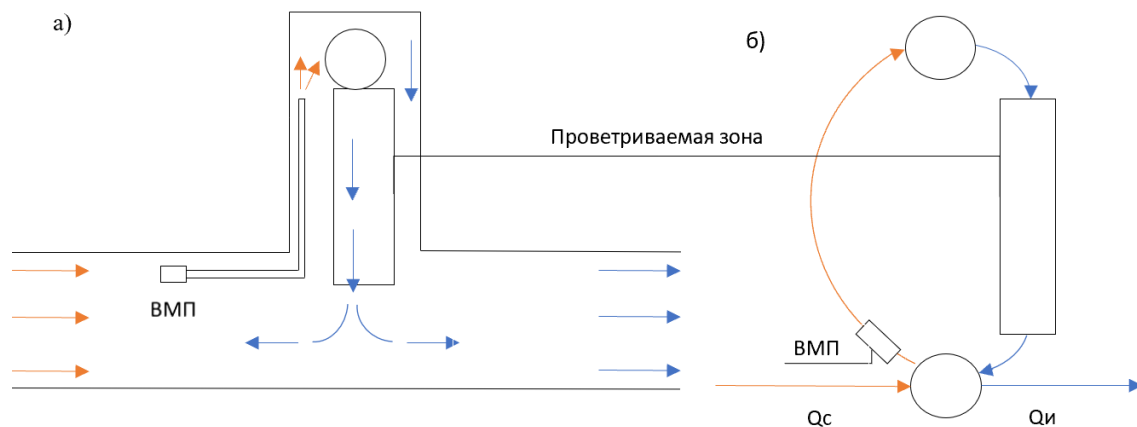


Рисунок 1.3 — Схема проветривания тупиковой выработки нагнетательным способом (а) и схема рециркуляционного контура (б)

Проветриваемая зона включает почти всю рабочую зону, то есть тупиковую выработку и часть выемочного штрека, по которому удаляется исходящая струя. Часть штрека, по которому приходит свежий воздух и где установлен вентилятор местного проветривания, собственно вентилятор и вентиляционный трубопровод образуют рециркуляционную зону. Все границы зон достаточно условны, при построении схемы рециркуляционного контура на рисунке 1.3 точки входа свежего воздуха в контур и выходов из проветриваемой зоны и контура были совмещены. Также были совмещены точки выхода из рециркуляционной зоны и входа в проветриваемую зону.

Если в рассматриваемом случае точки отбора и возврата рециркуляционного потока можно определить практически однозначно, то в других объектах рудничного проветривания, состоящих из множества выработок, конфигурация вентиляционной сети и структура установившегося там воздухораспределения делают выбор места отбора исходящей струи и места возврата ее в основной поток, подаваемый для проветривания, неоднозначным и более сложным. Поэтому организация рециркуляционного проветривания, для того чтобы она была функциональна и безопасна, должна следовать некоторым общим научно-обоснованным методическим правилам и осуществляться по отдельному проекту.

Несмотря на выполненные исследования на калийных рудниках недостаточно изучен вопрос динамики всех нормируемых компонентов воздуха, с учетом, например, возможного отсутствия процессов сорбции и влияния внутренних утечек воздуха внутри рециркуляционных контуров. В этом направлении есть работы [40,93], где предложены стационарные модели газораспределения при применении рециркуляционного проветривания, в том числе при наличии утечек воздуха. Но на основании разработанных

моделей не выполнен расчет требуемых параметров подачи воздуха к рециркуляционному контуру и на рабочие зоны.

Отсутствие завершенных исследований рециркуляционного проветривания с точки зрения газового фактора не позволяет в полной мере ответить на вопрос возможно ли применение рециркуляции в случае, если газовыделение в рабочей зоне носит постоянный характер и как влияют утечки воздуха, которые всегда присутствуют в системах вентиляции подземных рудников. И, несмотря на большое количество зарубежных и отечественных исследований и практическое применение систем рециркуляции, отсутствует исчерпывающее рассмотрение вопроса о параметрах проветривания рабочих зон при применении рециркуляции. В частности, какой предельно допустимый коэффициент рециркуляции может быть и как рассчитывать требуемое количество воздуха в рабочих зонах при наличии повторно используемого воздуха. Кроме того, отсутствуют исследования по влиянию газового состава воздуха на процессы воздухораспределения при наличии рециркуляционных контуров, в то время как расход воздуха в вентиляционной сети может изменяться в зависимости от наличия газовых примесей [115].

Таким образом действующие методики расчета количества воздуха учитывают особенности проветривания калийных рудников, но в них не в полной мере отражаются зависимости требуемого количества воздуха для проветривания рабочей зоны с учетом ненулевой концентрации газов в поступающем воздухе и не описана зависимость количества подаваемого свежего воздуха от коэффициента рециркуляции и величины утечек внутри рециркуляционного контура. Также применение рециркуляционного проветривания требует комплексной оценки, а именно сравнения способов рециркуляционного проветривания и снижения внутренних утечек, расчета возможности организации воздухораспределения с учетом аэродинамических особенностей системы вентиляции [57] и параметров газовыделения в горных выработках. Эти вопросы требуют дополнительных исследований для разработки универсальной методики расчета требуемого количества воздуха, применимой для рудников любого типа.

### **1.5. Цель и задачи исследования**

По результатам исследования состояния изученности вопроса сформулирована следующая цель и задачи исследования.

Цель — Разработка методики построения схем рециркуляционного проветривания для повышения эффективности систем вентиляции подземных рудников.

Для достижения цели требуется решить следующие задачи:

1. Провести натурные исследования газового состава рудничного воздуха в системах проветривания рудников различного типа и определить факторы, влияющие на безопасность и эффективность рециркуляционного проветривания рабочих зон.
2. Провести натурные исследования внутренних утечек воздуха и аэродинамических параметров систем вентиляции шахт и рудников для параметрического обеспечения расчетов безопасного применения рециркуляционного проветривания.
3. Разработать математическую модель расчета газовой обстановки в сети горных выработок произвольной топологии с учетом продольной дисперсии и наличия рециркуляционных контуров.
4. Разработать стандартизированные схемы рециркуляционного проветривания для типовых схем проветривания рудников и рабочих зон.
5. Разработать методику организации рециркуляционного проветривания подземных рудников произвольного типа с учетом их аэродинамических и газодинамических особенностей.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗЕРВОВ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ПО ГАЗОВОМУ ФАКТОРУ

С целью определения качественного состава воздуха исходящей струи и определения пригодности отработанного воздуха для его частичного повторного использования выполнены исследования газового состава рудничной атмосферы. Это позволит определить технический резерв систем вентиляции существующих рудников.

В рамках исследований выполнена комплексная оценка газовой динамики по ходу движения воздуха для различных типов рудников и определена степень влияния источников газовой выделенности (непосредственно забоев подготовительных и очистных выработок и погрузочно-доставочных машин с двигателями внутреннего сгорания) на концентрацию газа на исходящей струе. Для каждого рассматриваемого рудника проведено обследование вентиляционной сети, определены места проведения замеров, выполнен выбор приборов и оборудования, обработка и анализ результатов измерений.

Для рудников Российской Федерации допустимое содержание ядовитых и взрывоопасных газов в рудничной атмосфере регламентируется пунктом №151 «Правил безопасности ...» [66]. Вредные примеси, выделяющиеся на рудниках во время ведения различных технологических процессов сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 — Источники газовой выделенности

Фактор газовой выделенности	Выделяющиеся вредные примеси									
	CH <sub>4</sub> +H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	CH <sub>2</sub> O	Hg	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>
Горно-шахтное оборудование		+	+	+			+	+		
Взрывные работы		+	+	+	+					
Породный массив	+		+		+	+			+	+

Для оценки распространения газов и определения степени влияния источников газовой выделенности в вентиляционной сети рудника выполнены измерения концентрации газов и обработка результатов замеров с применением следующих приборов и оборудования:

- анемометр АПР-2 для измерения скорости воздуха;
- лазерный дальномер Leica DISTO для измерения длины;
- термовлагомер Fluke 971 для измерения температуры и влажности воздуха;
- одноразовый полипропиленовый шприц с катетерным наконечником для отбора проб;

- стеклянные бутылки емкостью 400 мл для отбора проб;
- газовый хроматограф «Хромос» для обработки проб;
- аспиратор сильфонный АМ-0059 и индикаторные трубки ГХ-Е для измерения концентрации газов экспресс-методом;

Таблица 2.2 — Диапазон измерения и перечень применяемых индикаторных трубок

Наименование индикатора	Диапазон измерения	
	Массовая концентрация, мг/м <sup>3</sup>	Объемная доля, % (10 <sup>4</sup> млн-1)
Оксид углерода (СО–0,25)	5,8...2,9×10 <sup>3</sup>	0,0005...0,25
Оксид углерода (СО–0,5)	2,9×10 <sup>3</sup> ...5,8×10 <sup>4</sup>	0,25...5,0
Сероводород (Н <sub>2</sub> С–0,0066)	4,7...93,0	0,00033...0,0066
Сернистый газ (SO <sub>2</sub> –0,007)	5,3...1,9×10 <sup>2</sup>	0,0002...0,007
Окислы азота (NO+NO <sub>2</sub> –0,005)	1,9...96,0	0,0001...0,005
Формальдегид (СН <sub>2</sub> О–1,5)	0,25...1,5	2,0×10 <sup>-5</sup> - 12,0×10 <sup>-5</sup>
Акролеин (С <sub>3</sub> Н <sub>4</sub> О–1,0)	0,1...1,0	4,3×10 <sup>-6</sup> - 43,0×10 <sup>-6</sup>

- переносные газоанализаторы Drager X-am 5600 для измерения концентрации газов экспресс-методом.

Таблица 2.3 — Диапазон измерения и перечень измеряемых параметров для газоанализатора Drager X-am 5600

Наименование сенсора прибора	Диапазон измерения	
	Объемная доля, % (10 <sup>4</sup> млн-1) <sup>3</sup> , ppm	Объемная доля, %
Диоксид углерода (IR CO <sub>2</sub> )	–	0...5
Оксид углерода (XXS CO)	–	0...2000
Сероводород (XXS H <sub>2</sub> S)	0...200	–
Двуокись азота (XXS NO <sub>2</sub> )	0...50	–
Окись азота (XXS NO)	0...200	–
Кислород (XXS O <sub>2</sub> )	–	0...25
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	0...100	-

В рамках проведения натурных исследований на руднике БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий», рудниках «Скалистый», «Комсомольский», «Таймырский», «Октябрьский», «Маяк» и «Заполярный» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», а также на шахте «Ангидрит» и шахте «Известняков» были выявлены основные тракты движения воздуха и составлены маршруты измерений газового состава воздуха от воздухоподающего ствола до вентиляционного через удаленные рабочие зоны с наибольшим выделением вредных веществ.

## 2.1. Натурные исследования газового состава воздуха в условиях рудника Верхнекамского месторождения калийных солей

В процессе добычи полезного ископаемого из породного массива выделяются взрывоопасные газы (метан и водород) и ядовитый газ сероводород. Также на руднике работает техника с двигателями внутреннего сгорания без постоянного присутствия в рабочей зоне, этот нестационарный источник газовыделения также вносит свой вклад в формирование газового состава рудничного воздуха. Так как все рудники Верхнекамского месторождения имеют схожие условия отработки и источники газовыделения рассмотрим результаты исследований газового состава воздуха на примере рудника БКПРУ-4.

Шахтное поле рудника БКПРУ-4 вскрыто вертикальными стволами по центральной схеме, способ проветривания всасывающий, система разработки камерная с оставлением ленточных целиков. Упрощенная схема рудника с указанием маршрутов проведения измерений, номеров замерных станций и основных вентиляционных объектов приведена на рисунке 2.1.

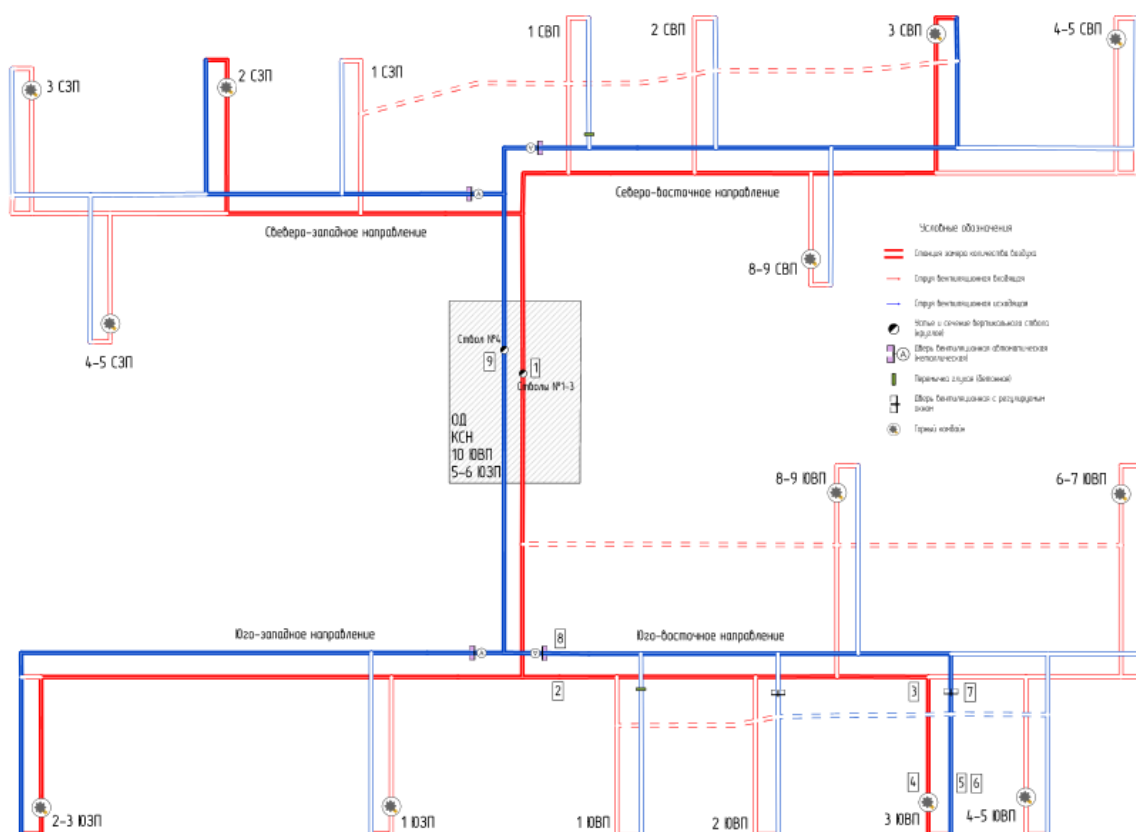


Рисунок 2.1 — Маршрут проведения измерений газового состава рудничной атмосферы на примере юго-восточного направления рудника БКПРУ-4



Натурные исследования выполнены на всех направлениях рудника в различные сезоны года, рассмотрим детально Юго-восточное направление, как направление с наибольшей газоносностью пластов и наибольшим количеством комбайновых комплексов в одновременной работе. Замеры концентрации газов и отбор проб рудничного воздуха выполнены тремя сериями и производились в следующих местах:

1. Воздухоподающий ствол №1 (ВС №1, свежая струя);
2. Главный юго-восточный транспортный штрек (ГЮВТШ, свежая струя);
3. Панельный транспортный штрек 3 ЮВП (ПТШ, свежая струя);
4. Блочный выемочный штрек (БВШ, свежая струя);
5. Рабочая зона комбайна Урал 20Р №35 (РЗ, отработанная струя);
6. Блочный вентиляционный штрек (БВШ, отработанная струя);
7. Панельный вентиляционный штрек (ПВШ, отработанная струя);
8. Главный юго-восточный вентиляционный штрек (ГЮВВШ, отработанная струя);
9. Вентиляционный ствол №4 (ВС №4, отработанная струя).

Измерения концентрации ядовитых и взрывоопасных газов выполнены для всех, указанных в пункте №151 «Правила безопасности...» [66] газов, на рисунках 2.2 — 2.4 приведены результаты замеров по зафиксированным в рудничном воздухе вредным примесям.

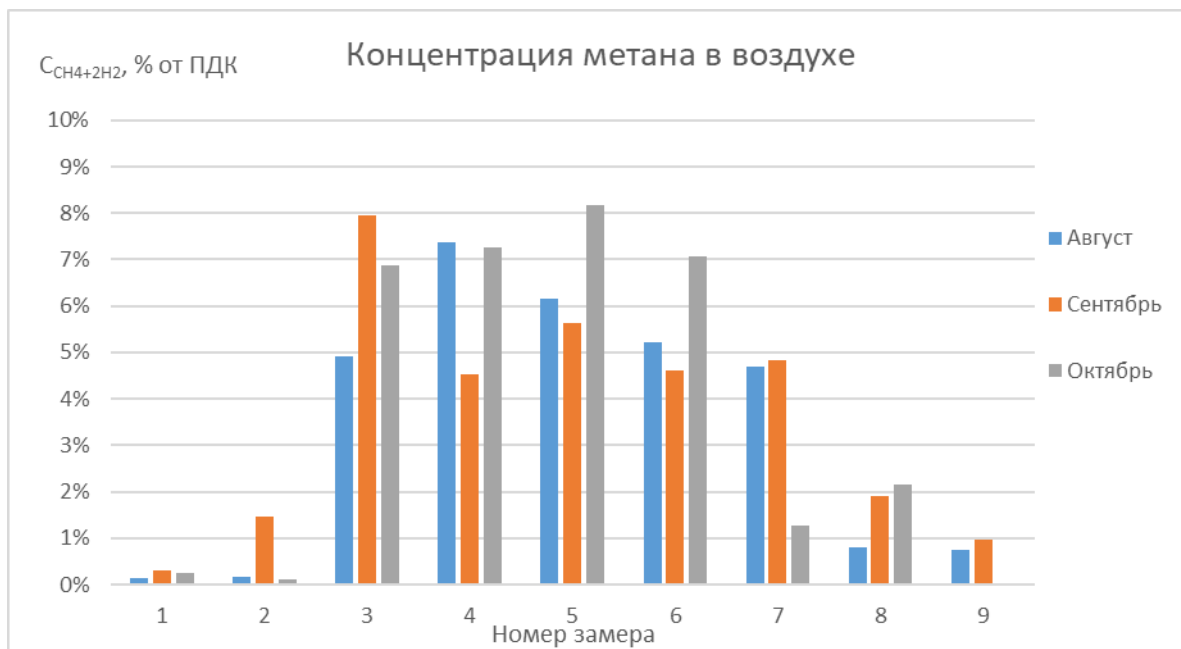


Рисунок 2.2 — Распределение горючих газов ( $\text{CH}_4+2\text{H}_2$ ) по пути движения воздуха

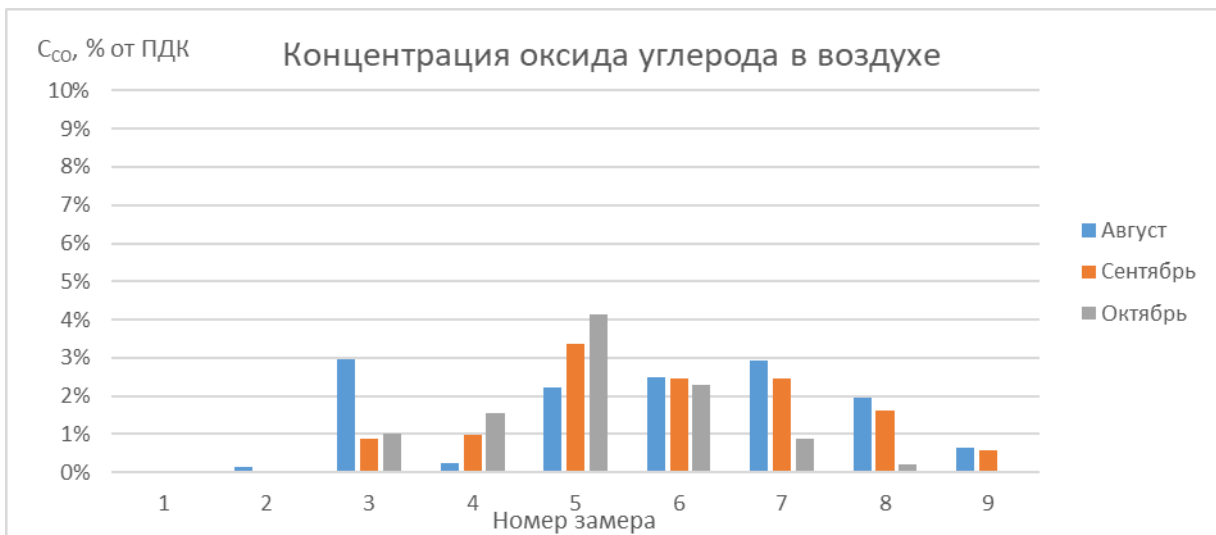


Рисунок 2.3 — Распределение оксида углерода (CO) по пути движения воздуха

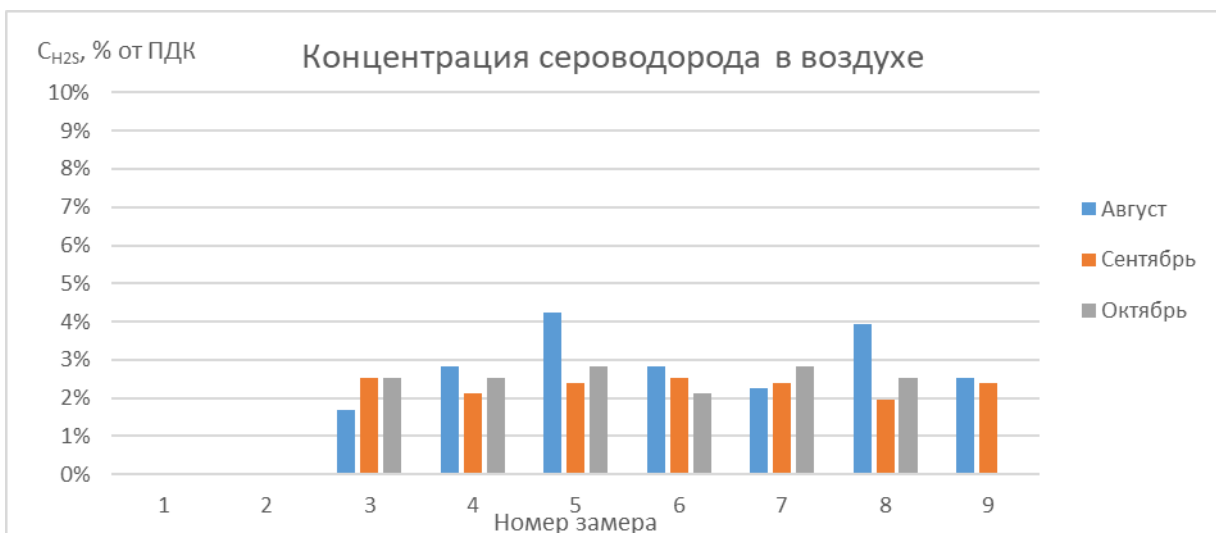


Рисунок 2.4 — Распределение сероводорода (H<sub>2</sub>S) по пути движения воздуха

Результаты исследований показали, что максимальная концентрация газов зафиксирована в рабочих зонах, далее по ходу движения отработанного воздуха наблюдается снижение концентрации газов по ряду причин: за счет его разбавления свежим воздухом утечек, и воздухом со смежных добычных участков, и за счет протекания сорбционных процессов. Наибольшая объемная концентрация метана не превышает 9,5 % от ПДК, а концентрации оксида углерода и сероводорода не превышают и 5% от ПДК. Это подтверждает результаты ранее проведенных исследований, доказывающих пригодность использования исходящей струи для повторного применения. Опыт исследований на калийных рудниках послужил предпосылками для проведения изучения газового состава воздуха и оценки возможности применения рециркуляции не только на калийных рудниках.

## 2.2. Натурные исследования газового состава воздуха в условиях медно-никелевых рудников Норильского промышленного района

В рамках исследований газового состава на рудниках Норильского промышленного района выполнены измерения на рудниках «Скалистый», «Комсомольский», «Таймырский», «Октябрьский», «Маяк» и «Заполярный» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», а также шахтах «Ангидрит» и «Известняков».

Рудник «Скалистый» ведет добычу сульфидных медно-никелевых руд Талнахского месторождения с применением сплошной слоевой системы разработки с полной закладкой выработанного пространства твердеющими материалами. Проветривание рудника «Скалистый» осуществляется всасывающим способом по фланговой схеме, свежий воздух подается по стволам ВСС-1 и ВЗС-1, отработанный воздух удаляется по стволу ВС-9. Также часть отработанного воздуха с рудника «Комсомольский» поступает в горные выработки рудника «Скалистый» по южным уклонам №1 и №2. Проветривание рудника «Скалистый» осуществляется всасывающим способом за счет работы ГВУ ВЦД 42,5. Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений представлены на рисунке 2.5.

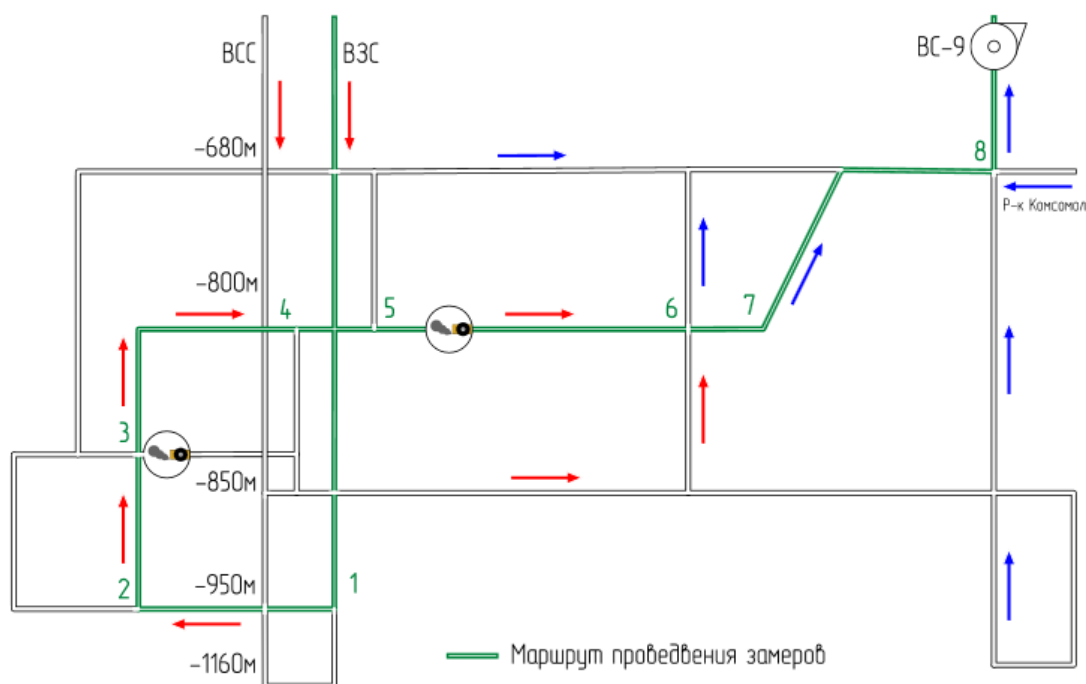


Рисунок 2.5 — Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений газового состава рудничной атмосферы на руднике «Скалистый»

В результате проведения измерений определено распределение концентраций газов в горных выработках для выбранного маршрута. На основании полученных данных

построена диаграмма распределения концентраций вредных примесей рудничной атмосферы, представленная на рисунке 2.6.

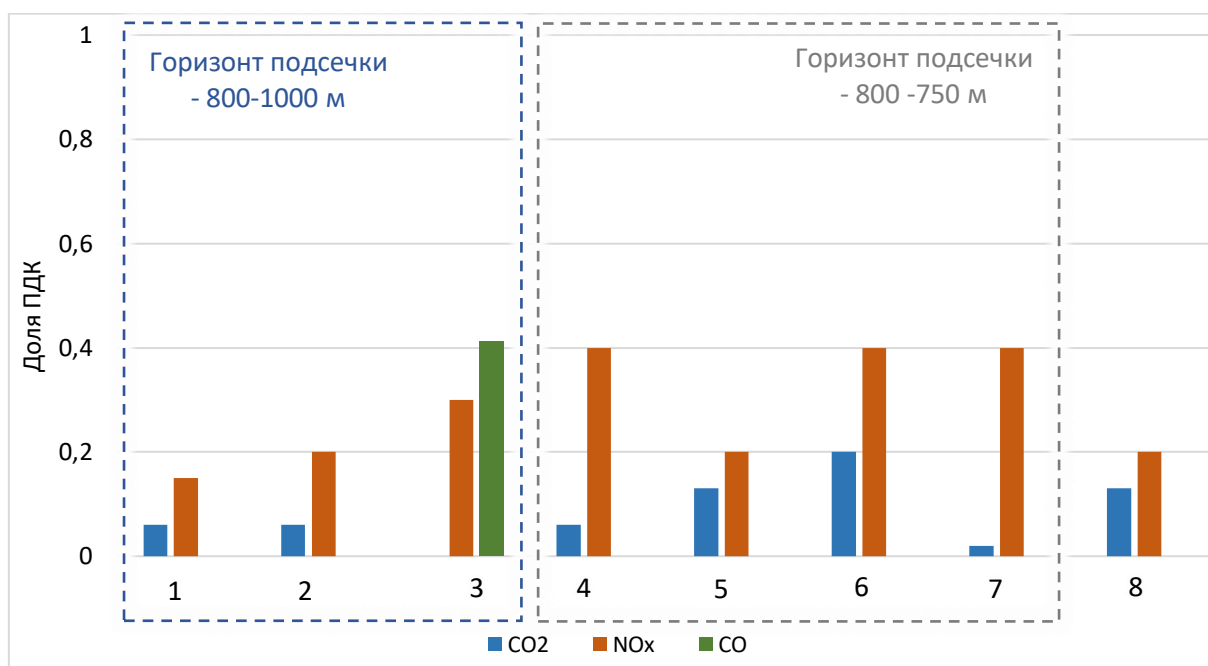


Рисунок 2.6 — Концентрация газов по маршруту проведения замеров

Измерения выполнены в следующих местах: ВШ (1) – РШЛ-24 (2) – ТУ «Север» (3) – ЮТУ-ОШ 1 (4) – РОл 41 (5) – СУ (6) – Заезд на ВЗУ 4 (7) – ствол ВС-9 г.-680 м (8).

Содержание кислорода во всех горных выработках составляет не менее 20 % по объему. Присутствия в рудничной атмосфере формальдегида, акролеина, паров ртути, сероводорода и сернистого газа не выявлено. В результате измерений установлено, что на добычных участках рудника «Скалистый» концентрации оксидов азота, оксида углерода и диоксида углерода не превышают допустимых значений. Наибольшие концентрации оксида углерода, оксида и диоксида азота выявлены в рабочих зонах и составляют не более 0,4 долей от ПДК.

Шахтное поле рудника «Комсомольский» включает южный и восточный фланги Талнахского рудного узла, который объединяет два месторождения медно–никелевых руд: Талнахское и Октябрьское. На руднике применяются слоевая и сплошная камерные системы разработки с полной закладкой выработанного пространства твердеющими материалами, а также камерно-целиковая с закладкой и последующей отработкой целиков.

Проветривание рудника «Комсомольский» осуществляется всасывающим способом по фланговой схеме. Свежий воздух в рудник поступает по стволам КС, СС, ВВС и ЗЗС. Отработанный воздух удаляется по юго-западному вентиляционному стволу (ЮЗВС), южному вентиляционному стволу (ЮВС) и северному вентиляционному стволу (СВС) за счет работы главных вентиляторных установок ВЦД-32М, ВРЦД-

4,5 и ВЦД-47 соответственно и частично по уклонам на рудник «Скалистый». Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений газового состава воздуха приведены на рисунке 2.7.

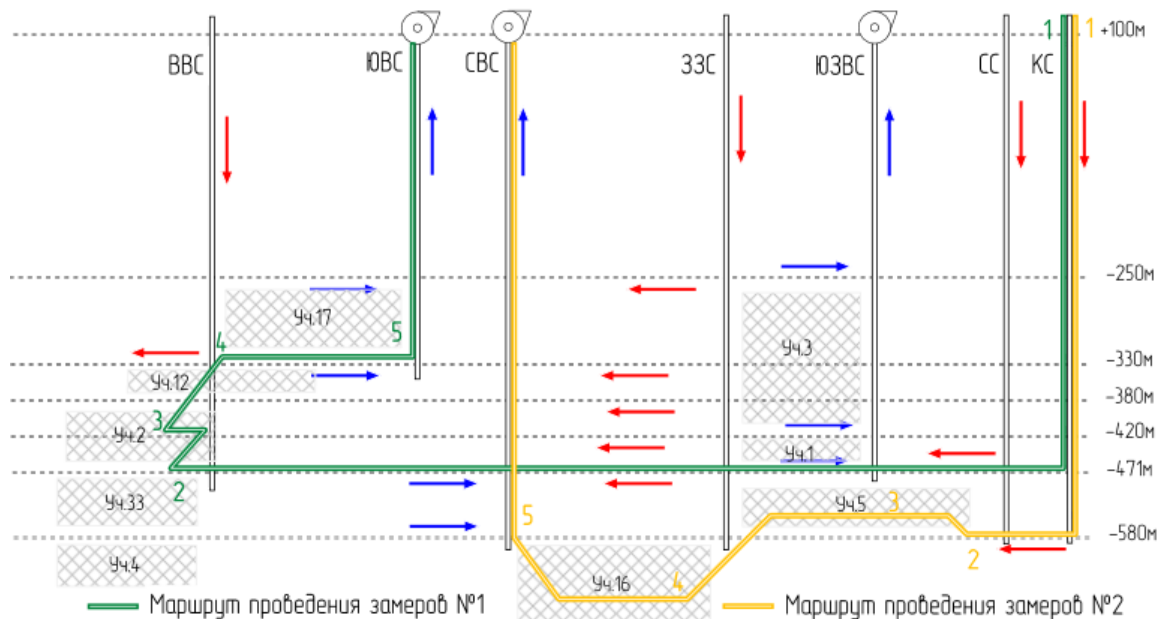


Рисунок 2.7 — Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений газового состава рудничной атмосферы на руднике «Комсомольский»

В результате проведения измерений определено распределение концентраций газов в горных выработках для выбранных маршрутов через участки №2 и №5. На основании полученных данных построены диаграммы распределения концентраций вредных примесей рудничной атмосферы, представленные на рисунках 2.8 и 2.9.

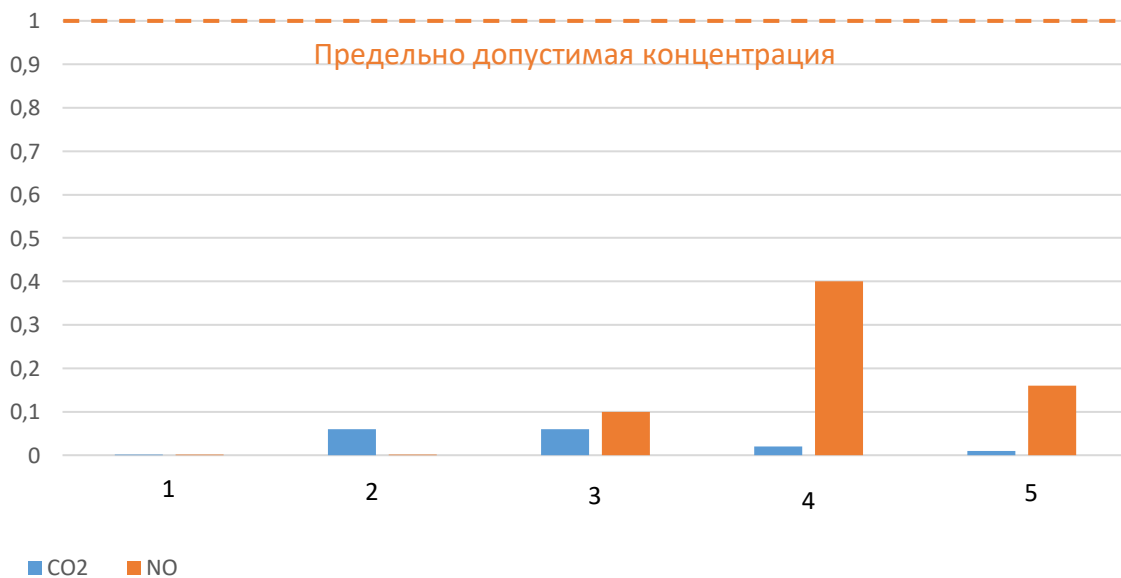


Рисунок 2.8 — Концентрация газов по маршруту проведения замеров №1

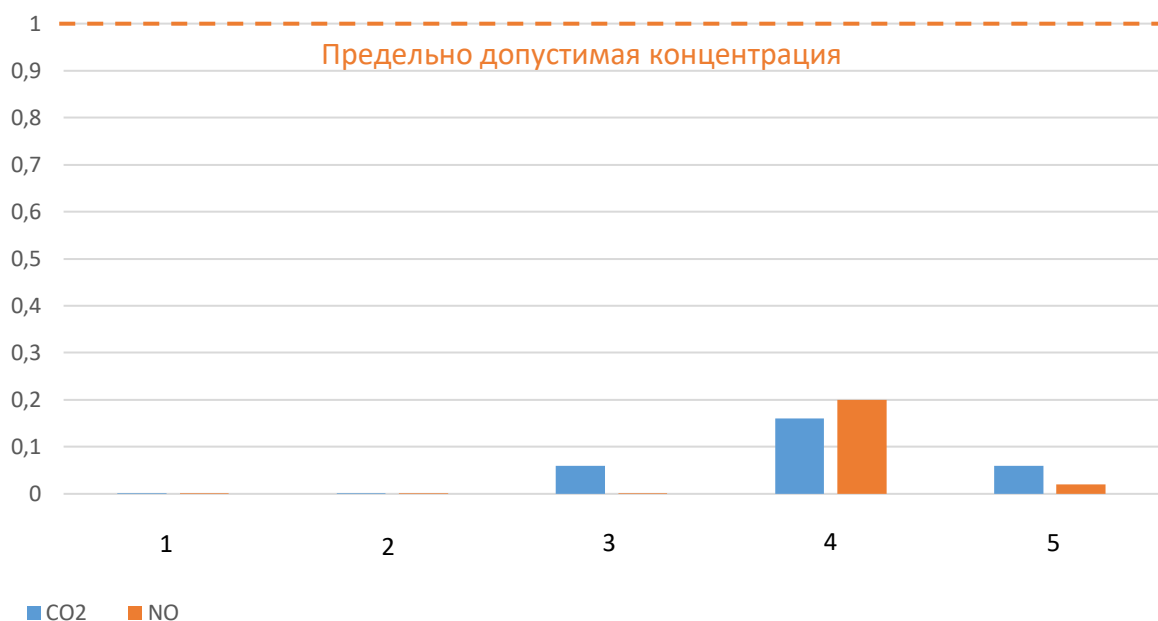


Рисунок 2.9 — Концентрация газов по маршруту проведения замеров №2

Измерения выполнены в следующих местах:

1. Атмосфера (1) – Заезд на ЗСШ 1 п/э (2) – ВУ (3) – ЗСШ 2 п/э (4) – ОШ 37 (5).
2. Атмосфера (1) – Грузовой квершлаг (2) – РО 18 (3) – ТУ (4) – СВУ (5).

Результат исследований показал, что в атмосфере горных выработок рудника Комсомольский зафиксированы такие газы, как диоксид углерода и оксид азота, максимальная доля предельно допустимой концентрации вещества была измерена в западном соединительном штреке 2 п/э для окислов азота и составляла 0,4. Наличие акролеина, формальдегидов, паров ртути, диоксида серы, сероводорода, метана и оксида углерода не выявлено. Содержание кислорода в горных выработках составляет не менее 20 % по объему.

Рудник «Таймырский» ведет отработку центральной части Октябрьского месторождения сульфидных медно-никелевых руд с применением сплошной слоевой и камерной систем разработки с полной закладкой выработанного пространства твердеющими материалами. Проветривание рудника осуществляется всасывающим способом по фланговой схеме. Свежий воздух в горные выработки поступает по воздухоподающим стволам КС-3, СС-3, ПЗС и ВПС, отработанный воздух после проветривания потребителей выдается на поверхность по стволам ВС-5, ВС-6 и ВС-7 за счет работы главных вентиляторных установок. Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений газового состава воздуха приведены на рисунке 2.10.

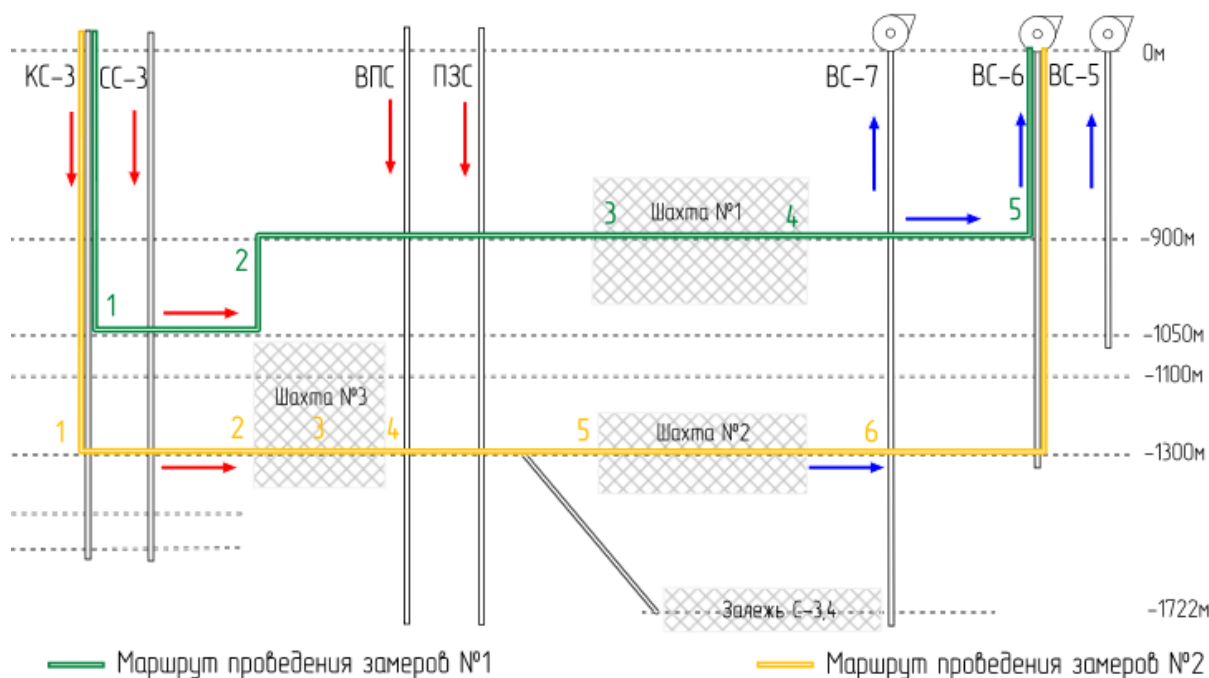


Рисунок 2.10 — Упрощенная схема проветривания и маршруты проведения измерений газового состава рудничной атмосферы на руднике «Гаймырский»

В результате проведения измерений определено распределение концентраций газов в горных выработках для выбранных маршрутов через шахту №1 и шахты №2 и №3. На основании полученных данных построены диаграммы распределения концентраций вредных примесей рудничной атмосферы, представленные на рисунках 2.11 и 2.12.

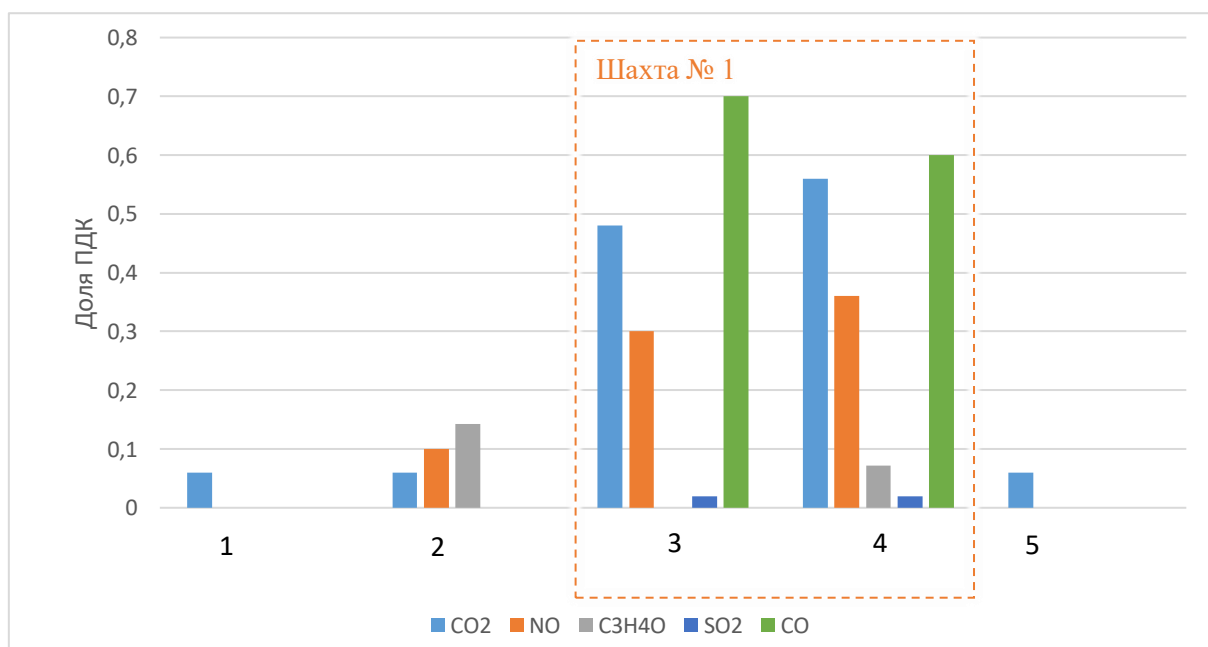


Рисунок 2.11 — Концентрация газов по маршруту проведения измерений №1

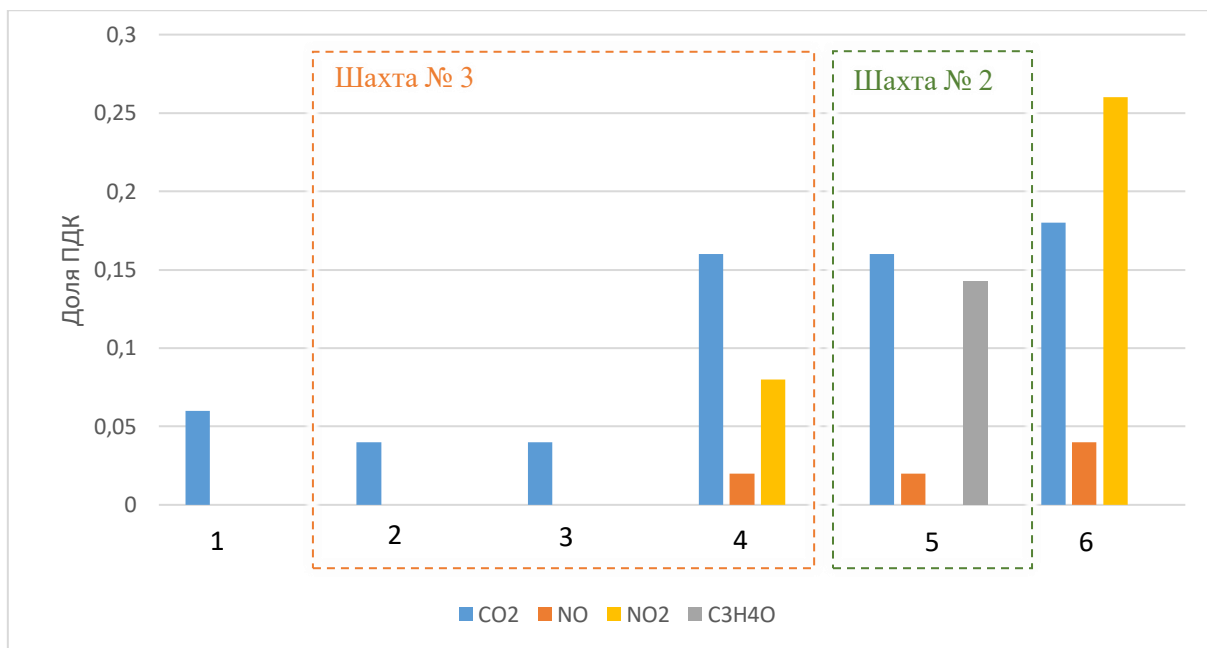


Рисунок 2.12 — Концентрация газов по маршруту проведения измерений №2

Измерения выполнены в следующих местах:

1. Гр.квершлаг -1050м (1) – ВШ-6 (2) – гор.-1000м (3) – СШ 2 (4) – ВС-6 (5).
2. Гр.квершлаг -1300м (1) – ЮСУ (2) – ТШЛ 55 (3) – СТУ (4) – РШ 12 (5) – ВК 1 (6).

Результат исследований показал, что в атмосфере горных выработок рудника Таймырский зафиксированы такие газы, как оксид и диоксид углерода, акролеин, оксид и диоксид азота, максимальная доля предельно допустимой концентрации вещества была измерена на заезде на горизонт -1000 м и составляла 0,7. Наличие формальдегидов, паров ртути, диоксида серы, сероводорода и метана не выявлено. Содержание кислорода в горных выработках составляет не менее 20 % по объему.

Рудник «Октябрьский» ведет отработку центральной части Октябрьского месторождения сульфидных медно-никелевых руд с применением сплошной слоевой и камерной систем разработки с полной закладкой выработанного пространства твердеющими материалами. Вскрытие залежи обрабатываемых богатых руд осуществляется одиннадцатью вертикальными стволами: четырьмя вентиляционными (ВС-1, ВС-2, ВС-3, ВС-4), двумя клетевыми (КС-1, КС-2), двумя скиповыми (СС-1, СС-2), вспомогательно-закладочным (ВЗС), вспомогательно-скиповым (ВСС) и грузовым (ГС). На руднике применяется всасывающий способ проветривания. Свежий воздух подается в горные выработки по стволам КС-1, КС-2, СС-1, СС-2, ГС, ВЗС и ВСС, далее после проветривания потребителей удаляется по вентиляционным стволам ВС-1, ВС-2, ВС-3 и ВС-4 за счет работы главных вентиляторных установок ВЦД-47 «Север», установленных на каждом



вентиляционном стволе. Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений газового состава воздуха приведены на рисунке 2.13.

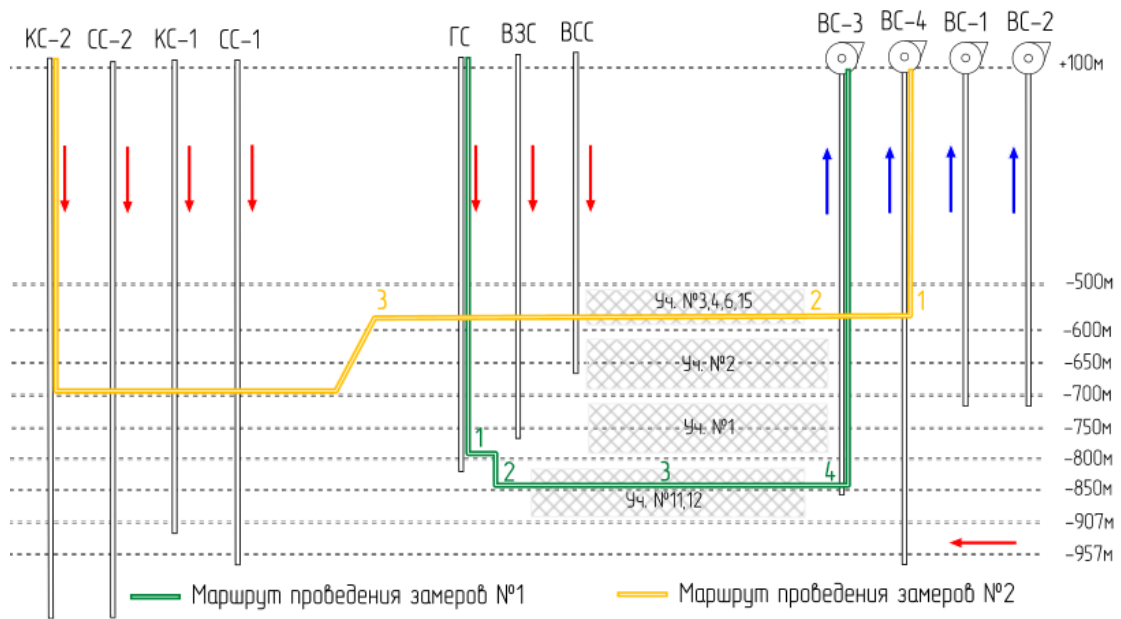


Рисунок 2.13 — Упрощенная схема проветривания и маршруты проведения измерений газового состава рудничной атмосферы на руднике «Октябрьский»

В результате проведения измерений определено распределение концентраций газов в горных выработках для выбранных маршрутов через участки №11,12 и участки №3,4,6,15. Для полученных данных построены диаграммы распределения концентраций вредных примесей рудничной атмосферы, представленные на рисунках 2.14 и 2.15.

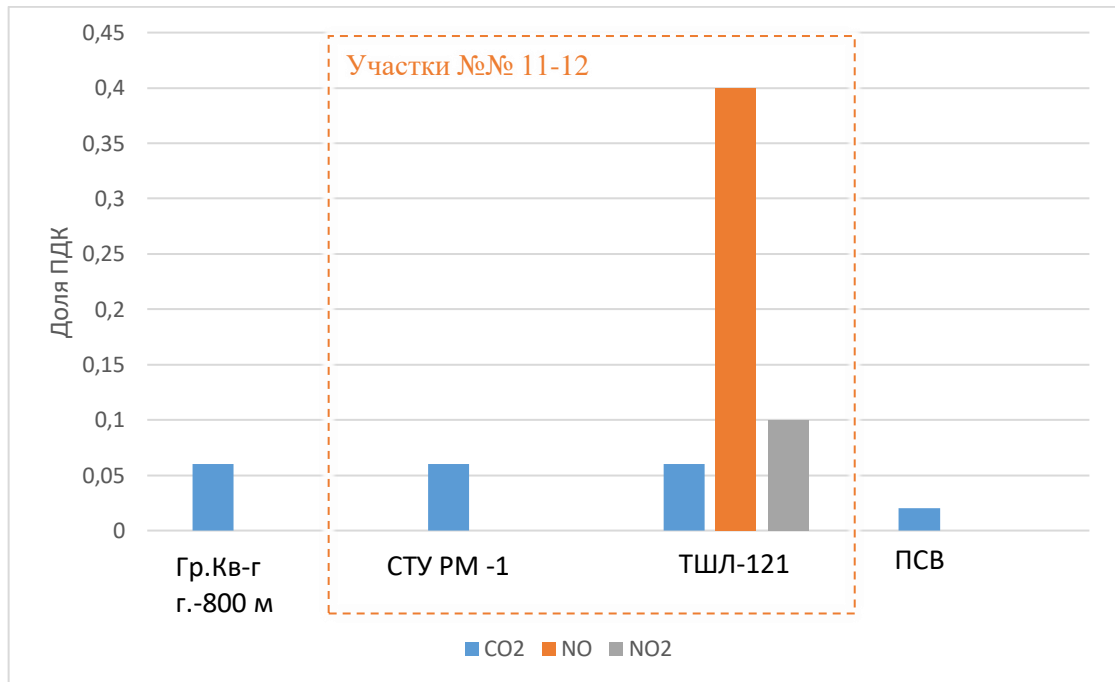


Рисунок 2.14 — Концентрация газов по маршруту проведения измерений №1

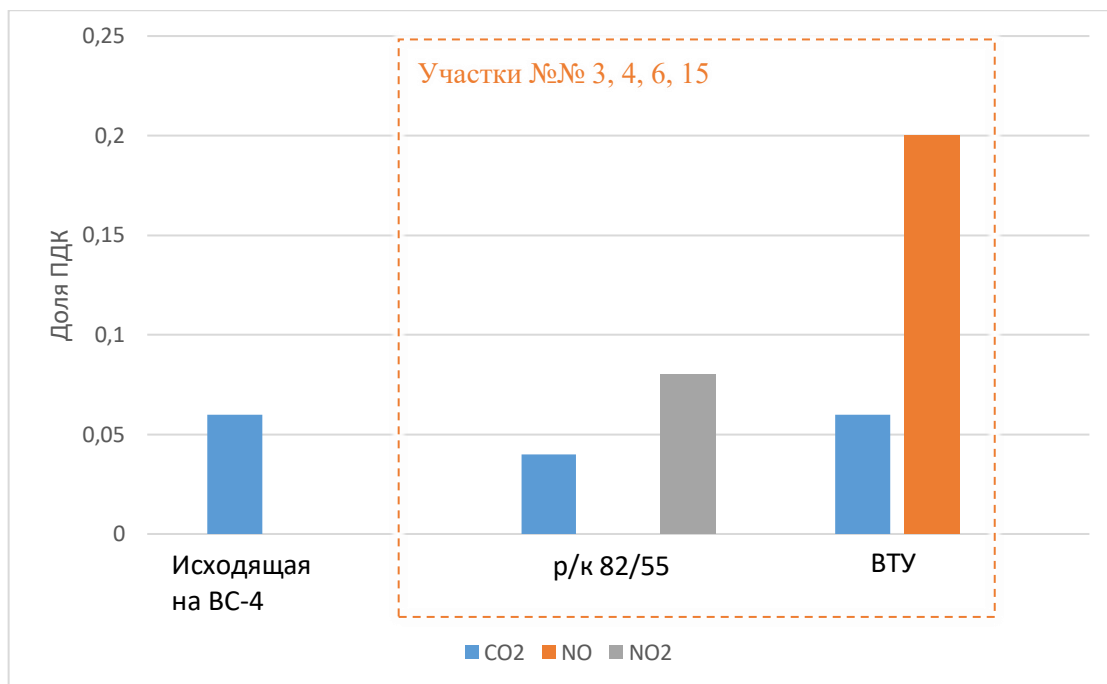


Рисунок 2.15 — Концентрация газов по маршруту проведения измерений №2

Измерения выполнены в следующих местах:

1. Гр.квершлаг -800м (1) – СТУ РМ-1 (2) – ТШЛ-121 (3) – ПСВ (4).
2. ВС-4 (1) – р/к 82/55 (2) – ВТУ (3).

Результат исследований показал, что в атмосфере горных выработок рудника Октябрьский зафиксированы такие газы, как диоксид углерода, оксид и диоксид азота, максимальная доля предельно допустимой концентрации вещества была измерена в рабочей зоне на ТШЛ-121 и составляла 0,4. Наличие оксида углерода, акролеина, формальдегидов, паров ртути, диоксида серы, сероводорода и метана не выявлено. Содержание кислорода в горных выработках составляет не менее 20 % по объему.

Рудник «Заполярный» разрабатывает вкрапленные сульфидные медно-никелевые руды месторождения «Норильск-1» открытым способом (рудник-карьер «Медвежий ручей») и подземным способом (рудник Заполярный) с применением этажной системы разработки с полным обрушением налегающих пород. Месторождение вскрыто вертикальными стволами 9-бис и 7-бис, западной и восточной штольнями, автотранспортным и конвейерным уклонами, пройденными с борта карьера «Медвежий ручей». Проветривание осуществляется нагнетательно-всасывающим способом. Свежий воздух подается по стволу 9-бис и по западной и восточной штольням, отработанный воздух после проветривания потребителей удаляется по стволу 7 бис, автотранспортному и конвейерному уклонам. На стволе 9-бис установлена нагнетательная главная вентиляторная установка ВЦД-32М, на стволе 7-бис установлена всасывающая главная вентиляторная

установка ВЦД-31,5М. Также на автотранспортном уклоне установлен всасывающий вспомогательный вентилятор Howden AG 300KN+9ЕКЕ. Упрощенная топология горных выработок и маршруты проведения измерений газового состава воздуха представлены на рисунке 2.16.

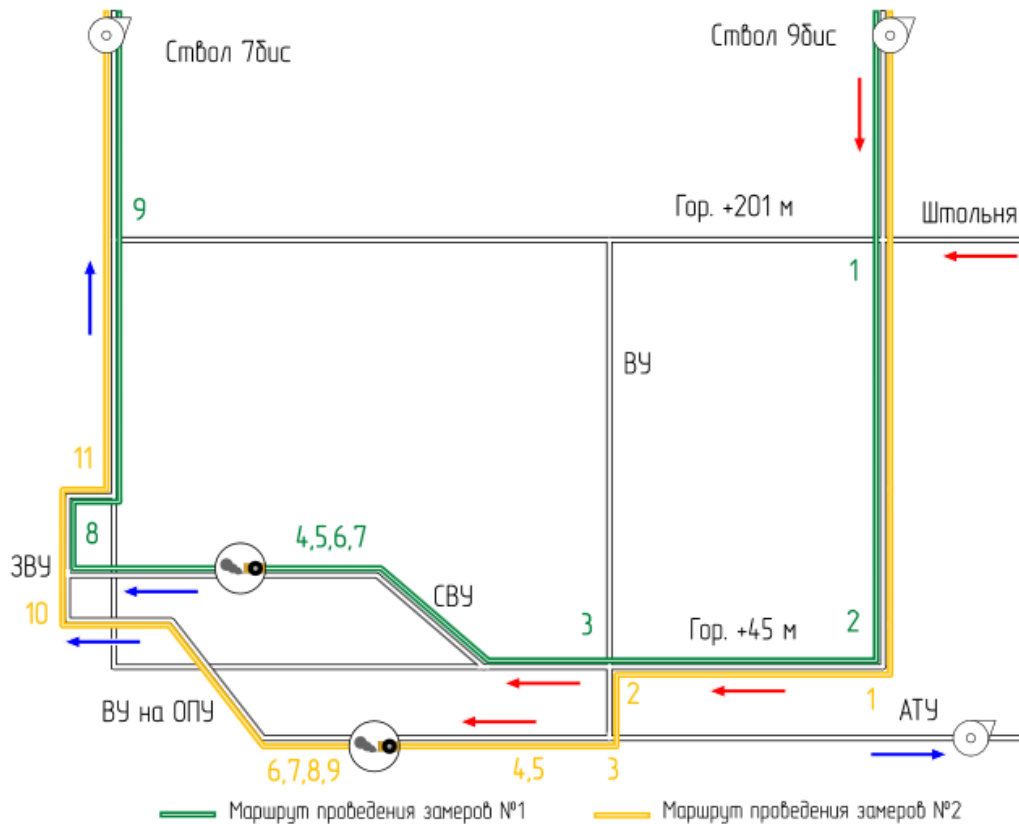


Рисунок 2.16 — Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений газового состава рудничной атмосферы на руднике «Заполярный»

По маршрутам №1 и №2 измерения выполнены в следующих местах:

1. Ствол 9 бис (1) –ТДО 3/4 (2) – ТДВ (3) – БДШ 1 запад (4) – ТДО 11(5) – БДШ 1 бис (6) – ЗВУ 1 (7) – ЗВУ 1 (8) – ствол 7бис (9).
2. Ствол 9 бис (1) – конвейерный уклон (1) – АТУ (3) – АТУ (4) – АТУ на ШПУ (5) – сборочный уклон (6) – ВВУ ШГПО 4 (7) – ОГПО 4/4 (8) – ШГПО 3 (9) – ТДВ (10) – ствол 7 бис (11).

Распределение концентраций газов по пути движения воздуха приведено на рисунках 2.17 и 2.18 для маршрутов №1 и №2 соответственно.

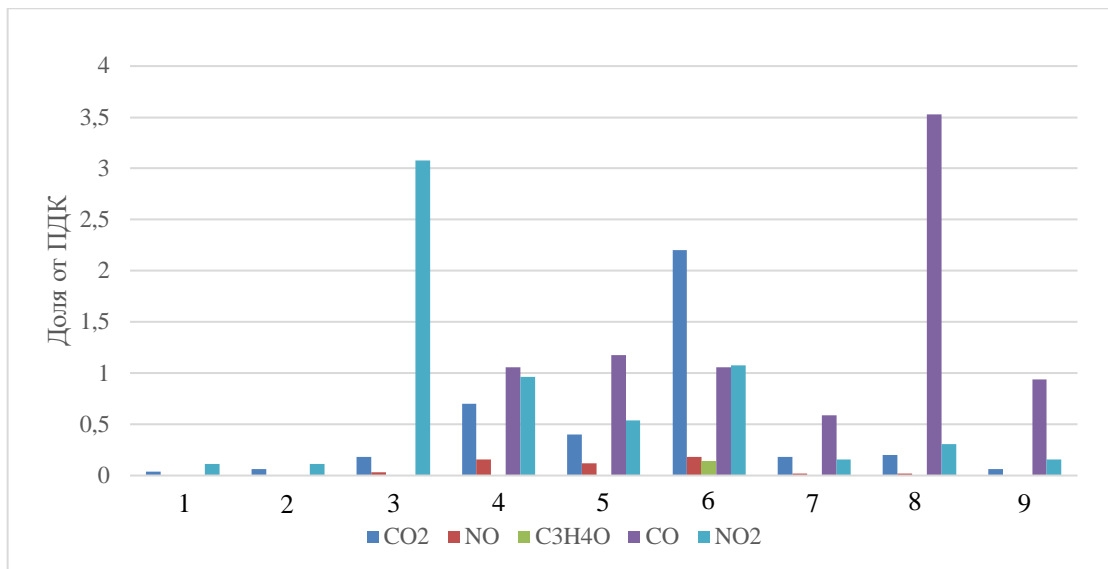


Рисунок 2.17 — Концентрация газов по маршруту №1

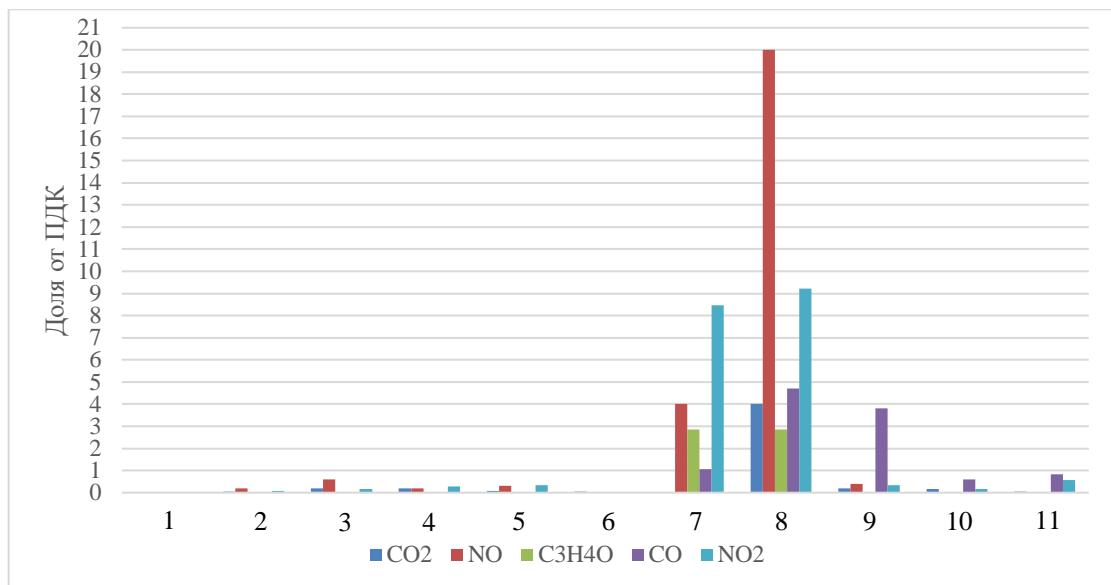


Рисунок 2.18 — Концентрация газов по маршруту №2

Содержание кислорода во всех горных выработках составляет не менее 20 % по объему. Присутствия в рудничной атмосфере формальдегида, паров ртути, сероводорода и сернистого газа не выявлено.

В результате измерений установлено, что на добычных участках рудника «Заполярный» концентрации оксида азота, диоксида азота, оксида углерода, диоксида углерода и акролеина превышают допустимые значения. Причиной превышений являются ситуации, связанные с нарушением проветривания, а именно, последовательное проветривание двух и более участков при недостаточном количестве свежего воздуха.

Шахта «Ангидрит» рудника «Кайерканский» обрабатывает продуктивный пласт ангидрита Горозубовского месторождения с применением камерно-целиковой системы разработки.

Месторождение вскрыто центральной грузовой штольной (ЦГШ) и центральной порожняковой штольной (ЦПШ), расположенными в центре месторождения, западным вентиляционным шурфом (ЗВШ), расположенным на западном фланге месторождения, западным вентиляционным уклоном (ЗВУ), расположенным на западном фланге, а также восточными вентиляционными шурфами № 1 и № 2 (ВВШ № 1 и ВВШ № 2 соответственно), расположенными на восточном фланге.

На шахте применяется всасывающий способ проветривания. Свежий воздух на Западный фланг за счет общешахтной депрессии поступает по ЦГШ и ЦПШ, на Восточный фланг по ВВШ №1 и ВВШ №2. После проветривания рабочих зон отработанный воздух поступает на ЗВШ №1 и №2, далее за счет работы ГВУ удаляется на поверхность.

Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений газового состава воздуха представлены на рисунке 2.19.

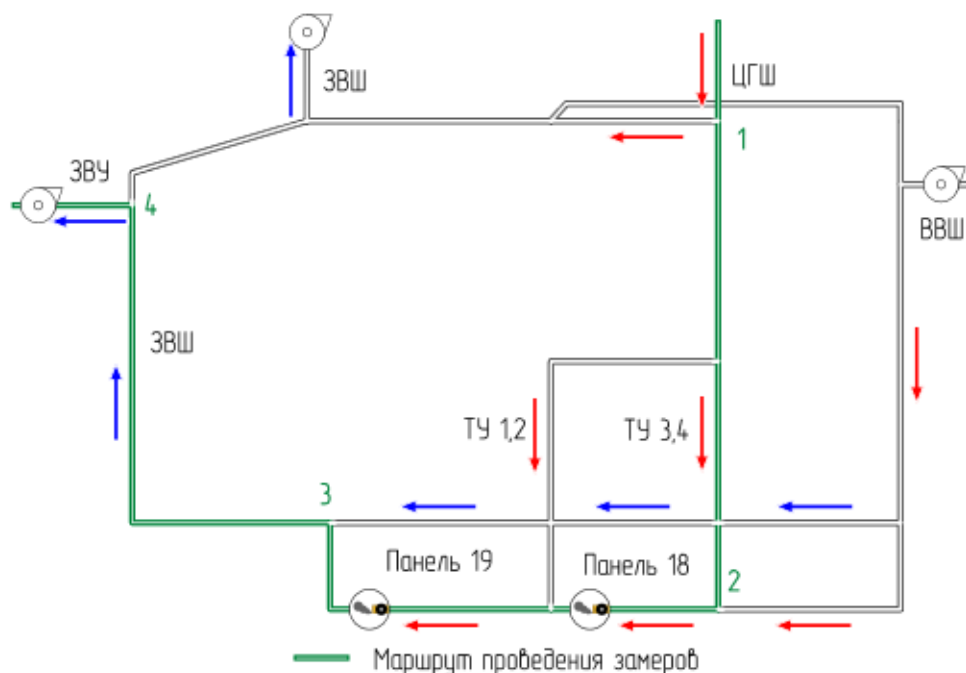


Рисунок 2.19 — Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений газового состава рудничной атмосферы на шахте «Ангидрит»

Маршрут включает измерения в следующих местах: ЦГШ (1) –ТУ 3 и ПШ 16 (2) – ТШ 17 и ЗВШ (3) – ЗВУ (4). Распределение концентраций газов по маршруту представлено на рисунке 2.20.

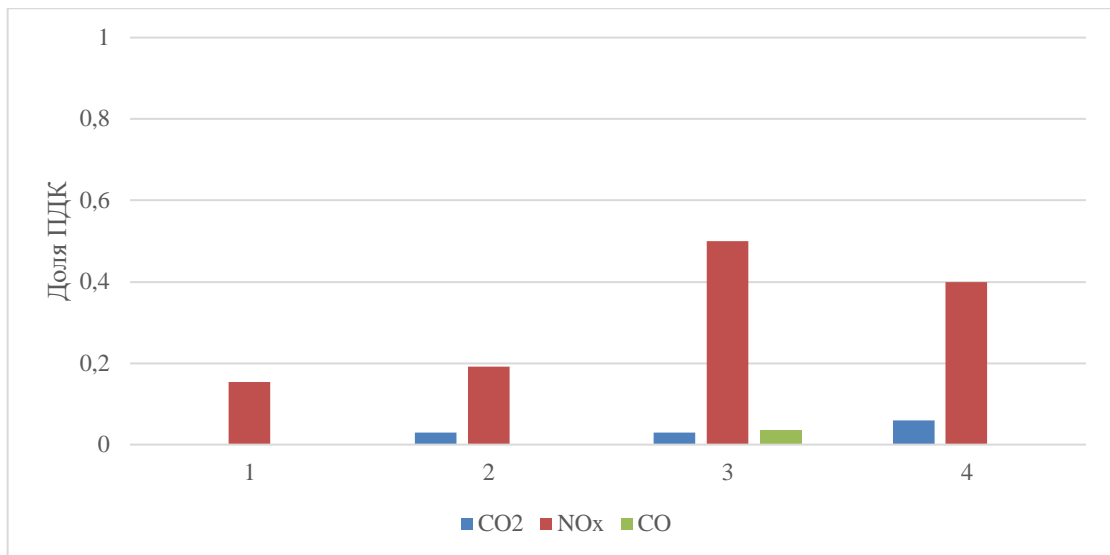


Рисунок 2.20 — Концентрация газов по маршруту

В результате измерений установлено, что в рудничной атмосфере шахты «Ангидрит» присутствуют оксид азота, диоксид азота и оксид углерода в концентрациях, не превышающих допустимых значений.

Шахта «Известняков» рудника «Кайерканский» обрабатывает продуктивный пласт известняков Каларгонского месторождения. Оработка осуществляется с применением камерно-целиковой системы разработки с оставлением ленточных междукамерных целиков.

Месторождение вскрыто наклонной транспортной штольной (НТШ) и наклонной воздухоподающей штольной (НВШ), расположенными на восточном фланге месторождения, вентиляционным стволом № 2 (ВС № 2), расположенным на западном фланге месторождения, северными вентиляционно-транспортным и транспортным уклонами (СВТУ и СТУ соответственно), расположенными на западном фланге, а также вентиляционным шурфом № 1 (ВШ № 1), расположенным в центре месторождения.

Проветривание шахты «Известняков» осуществляется нагнетательным способом. Атмосферный воздух вентилятором главного проветривания ВОД-40 нагнетается в подземные горные выработки с поверхности по наклонным штольням: НВШ и НТШ. Далее распределяется в транспортные и вентиляционные штреки, из которых поступает в очистные и проходческие забои, а также в технологические камеры. После проветривания очистных, отработанный воздух выдаётся по ВС № 2, СВТУ и СТУ на поверхность в атмосферу. Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений газового состава воздуха представлены на рисунке 2.21.

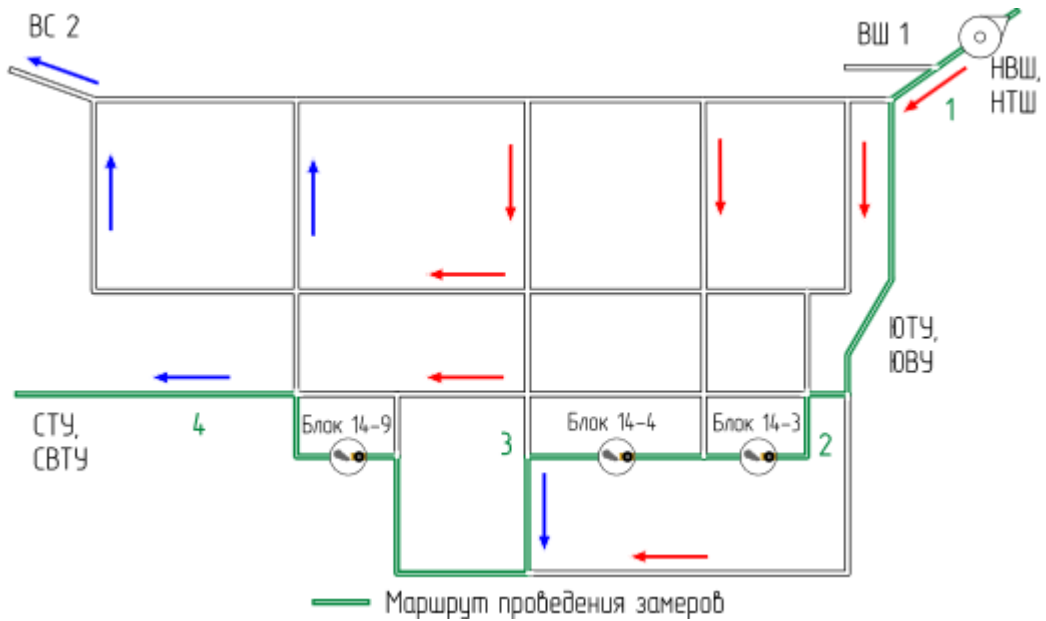


Рисунок 2.21 — Упрощенная схема проветривания и маршрут проведения измерений газового состава рудничной атмосферы на шахте «Известняков»

Маршрут включает измерения в следующих местах: НВШ (1) – ВС №2 и ТШ 14 (2) – ТШ 14 и ВС №3 (3) – СТУ и СВТУ (4). Распределение концентраций газов по маршруту представлено на рисунке 2.22.

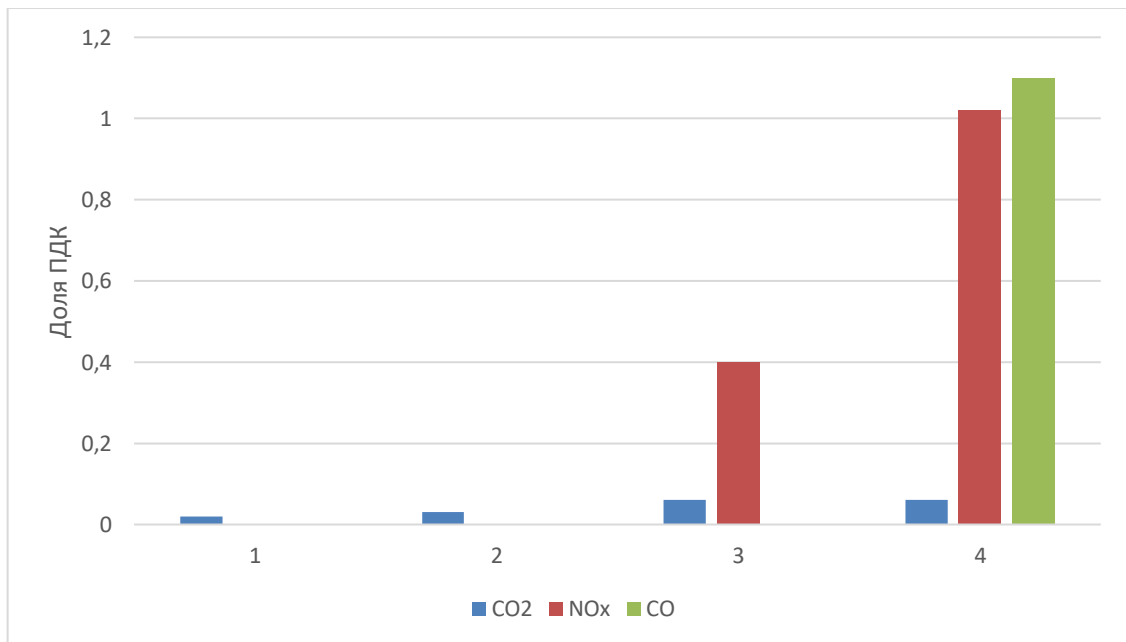


Рисунок 2.22 — Концентрация газов по маршруту

Результат измерений показал, что в рудничной атмосфере шахты «Известняков» присутствуют оксид, диоксид азота, оксид углерода и диоксид углерода, при этом на общей исходящей струе концентрации газов превышают допустимые значения по причине нарушения проветривания.

Также в рамках натурные исследований были выполнены экспериментальные измерения газового состава рудничного воздуха исходящей струи в зависимости от удаленности от рабочих зон, где происходят газовыделения.

Измерения, выполненные ранее для вентиляционных сетей рудников, охватывали большое количество шахт и рудников, но имели точечный характер, а именно результат измерения фиксировался непосредственно в момент замера в добычную смену во время работы самоходной техники с ДВС. Эти результаты позволили сделать вывод о возможности применения рециркуляционного проветривания, но для оценки безопасности следует уделить особое внимание динамике изменения концентрации газов в течение смены. Это позволит оценить влияние мест расположения, времени и цикличности работы машин с ДВС на состояние газового состава рудничной атмосферы. Рассмотрим динамику изменения концентраций газов на различных замерных точках рудника по ходу движения отработанного воздуха. Всего для проведения исследований в горных выработках было установлено три переносных газоанализатора Drager Ham 5600 с функцией записи в характерных местах, таких как исходящая струя из рабочей зоны, исходящая с участка и исходящая с рудника. На рисунке 2.23 представлены результаты измерений концентрации оксида углерода (CO) на руднике «Октябрьский».

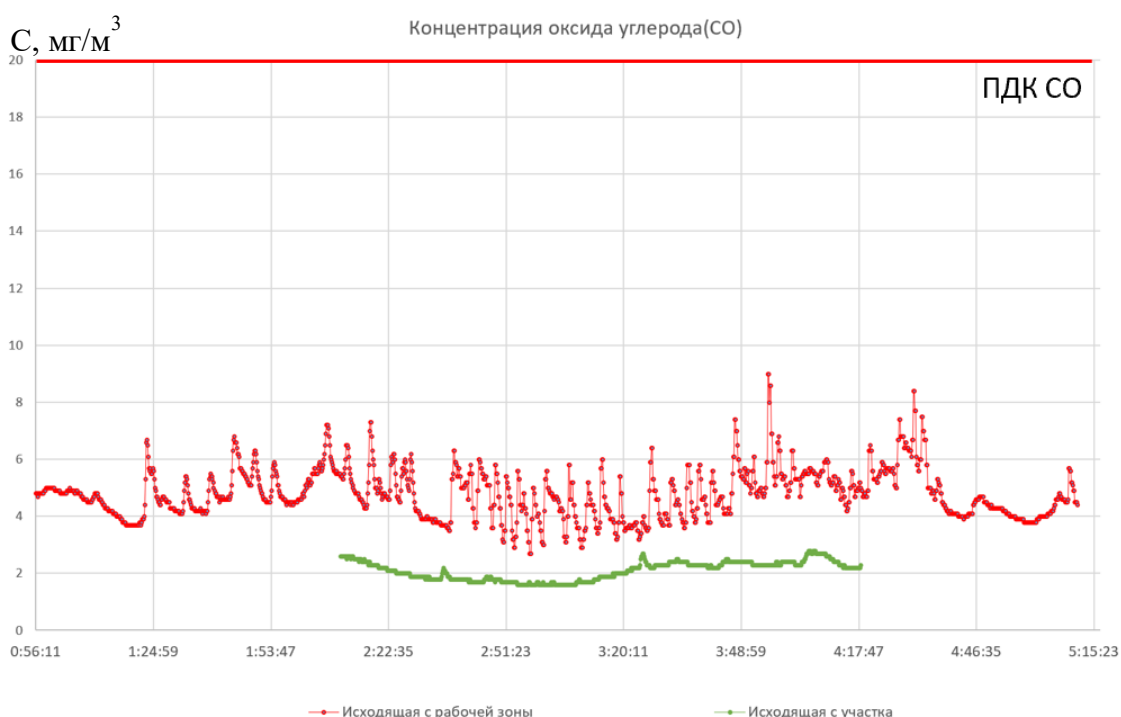


Рисунок 2.23 — Результат измерений концентрации оксида углерода

На графике изменения концентрации газа отчетливо прослеживаются пики газовой выделений в непосредственной близости от рабочей зоны, связанные с цикличностью работы погрузочно-доставочных машин с ДВС. Далее по пути движения воздуха на



исходящей струе с участка прослеживаются менее отчетливые пики, а график концентрации на исходящей струе горизонта к стволу ВС-4 и вовсе выполаживается. Кроме этого, величина концентрации газа снижается по ходу движения воздуха. Все это в совокупности указывает на разбавление исходящей струи воздухом утечек и присутствие процесса диффузии, когда при движении воздуха происходит размывание примесей рудничной атмосферы по длине горных выработок. Это наглядно видно на представленном примере для рудника «Октябрьский». Графики измерений по диоксиду азота, оксиду углерода и другим газам, а также графики измерений для других рудников («Таймырский», «Скалистый» и др.) показали схожие результаты. Таким образом, можно сделать вывод о существенном влиянии диффузионных процессов на характер распространения газовых примесей по горным выработкам и необходимости учета механизма диффузии при расчете газораспределения в моделях рудничных вентиляционных сетей.

### 2.3. Анализ влияющих факторов на газовый состав исходящей струи воздуха

Натурные измерения газового состава рудничной атмосферы показали, что на большинстве исследуемых рудников концентрации газов на исходящих струях не превышают допустимых значений. Результаты замеров газового состава воздуха на исходящих струях на исследуемых рудниках показывают, что концентрации вредных газов также не превышают допустимых значений, поэтому возникли предпосылки для проведения детальных исследований газовой динамики на рудниках различного типа с целью выявления причин низких концентраций газов на исходящих струях и обоснования возможности применения рециркуляционных систем. Сводные результаты натурных исследований приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 — Результаты измерений газового состава рудничного воздуха

	CH <sub>4</sub> +H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	CH <sub>2</sub> O	Hg
БКПРУ-4	+					+			
Известняков		+	+	+					
Ангидрит		+	+	+					
Заполярный		+	+	+			+		
Скалистый		+	+	+					
Комсомольский			+	+					
Таймырский		+	+	+			+		
Октябрьский		+	+	+					

Причин повышения концентрации газов выше допустимых значений может быть несколько, это ошибки в расчетах и проектировании вентиляционных систем, включающие некорректный учет мощности источников газовой выделений, недостаточное количество подаваемого свежего воздуха и значительная величина внутренних утечек воздуха по пути движения воздуха. В случае, если грубые нарушения в системе проветривания отсутствуют, концентрации газов на исходящей струе значительно меньше допустимых значений.

Для исследования факторов, влияющих на качество воздуха на исходящей струе, рассмотрим проветривание участков на одном простейшем примере, где вентиляционная система включает выработки со свежим и отработанным воздухом, утечки и одну рабочую зону, где находится источник газовой выделений, действующий постоянно (рисунок 2.24).

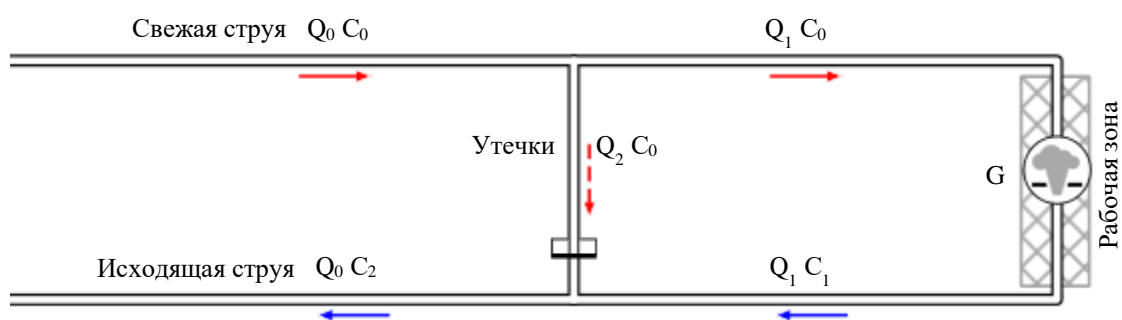


Рисунок 2.24 — Упрощенная схема распределения воздушных потоков

При этом следует иметь в виду, что в реальности все природные и техногенные источники выделения газов являются принципиально непостоянными. Так, например, газовыделение из массива имеет максимальные значения в момент отбойки руды и далее резко снижается. Выделение вредных газов при работе машин с ДВС также максимально в период интенсивной работы техники и носит периодический характер. Все это является прямым следствием цикличности горнотехнических процессов. При этом для расчета количества воздуха ориентируются на максимально возможные газовыделения, часто применяя, например, правило «трех сигм»:

$$G_p = \frac{\bar{G}}{3 \cdot \sigma}, \quad (2.1)$$

где  $\bar{G}$  — среднее газовыделение за расчетный период, м<sup>3</sup>/с;  $G_p$  — расчетное газовыделение, м<sup>3</sup>/с;  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение.

Кроме того, в методики расчета количества воздуха зачастую вносится еще технический запас на подачу избыточного количества воздуха. Таким образом, для

определения расчетного количества воздуха на отдельной рабочей зоне применяется следующая принципиальная формула:

$$Q_p = K_{\text{изб}} \frac{G_p}{c_{\text{ПДК}}}, \quad (2.2)$$

где  $K_{\text{изб}}$  — коэффициент запаса на подачу свежего воздуха, учитывающий неравномерность распределения воздуха;  $c_{\text{ПДК}}$  — предельно-допустимая концентрация газа,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

в которой расчетное газовыделение закладывается максимально возможным, а также предусматривается некоторый коэффициент запаса на подачу воздуха. Оба этих фактора влияют на то, что количество подаваемого воздуха на рабочую зону при фактически наблюдаемых газовыделениях будет приводить к недостижению предельно допустимых значений концентраций газа на исходящей струе.

Следующим фактором, снижающим концентрацию газа на исходящей струе, является наличие утечек воздуха. Исходящая струя воздуха по пути движения подпитывается свежим воздухом за счет утечек, что приводит к разжижению газов и снижению их концентраций. Из схемы на рисунке 2.24 можно сделать вывод, что итоговая формула для определения концентрации газа на исходящей струе после утечек будет иметь вид:

$$c_2 = \frac{G}{Q_1 + Q_2}, \quad (2.3)$$

где  $G$  — расчетное газовыделение,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_1$  — количество воздуха, поступающее в рабочую зону,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_2$  — количество утечек свежего воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Если данное выражение переписать через принятое определение коэффициента утечек:

$$K_{\text{ут}} = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}, \quad (2.4)$$

тогда концентрация газа на общей исходящей струе будет определяться как:

$$c_2 = (1 - K_{\text{ут}}) \cdot c_1. \quad (2.5)$$

Здесь  $K_{\text{ут}}$  — коэффициент утечек;  $c_1$  — концентрация газа после источника газовыделения  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $c_2$  — концентрация газа на общей исходящей струе,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

И будет тем меньше, чем больше коэффициент утечек. На практике проветривания рудников для обеспечения подачи требуемого количества воздуха к потребителям закладывается дополнительный коэффициент запаса на подачу свежего воздуха, рассчитываемый как:

$$K_3 = \frac{1}{(1 - K_{\text{ут}})}. \quad (2.6)$$

Таким образом, концентрация газа на исходящей струе с точки зрения воздушного и газового балансов может быть определена следующим выражением:

$$c_2 = K_3 \cdot \frac{G(t)}{Q_p}. \quad (2.7)$$

И при подаче расчетного количества воздуха, согласно формуле (2.2), будем иметь:

$$c_2 = \frac{1}{K_3} \cdot \frac{1}{K_{\text{изб}}} \cdot \frac{G(t)}{G_p} \cdot c_{\text{ПДК}}, \quad (2.8)$$

где  $K_3$  — коэффициент запаса на подачу свежего воздуха, учитывающий утечки;  $G(t)$  — фактическое газовыделение с учетом цикличности работы оборудования, м<sup>3</sup>/с.

В выражении 2.8 все три перемножаемые дроби в правой части выражения меньше единицы, что говорит о существенном отличии концентрации воздуха в главных исходящих выработках от предельно допустимых, на которые ориентирован расчет требуемого количества воздуха.

Существует еще один механизм, приводящий к снижению концентрации газов в воздухе на главных исходящих струях. Пиковые газовыделения, которые могут приводить к приближению концентрации газа на исходящей струе к предельно допустимым значениям, в силу их кратковременности и протекания диффузионных процессов будут стремиться к средним интегральным значениям:

$$\bar{c}_2 = \frac{1}{K_3} \cdot \frac{1}{K_{\text{изб}}} \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} G(t) dt}{G_p(t_2 - t_1)} \cdot c_{\text{ПДК}}, \quad (2.9)$$

где  $\bar{c}_2$  — средняя концентрация газа на исходящей струе после утечек, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $t_2$  — время окончания действия источника газовыделения, с;  $t_1$  — время начала действия источника газовыделения, с.

Снижение и выравнивание концентраций будет происходить тем быстрее, чем интенсивнее и дольше протекают диффузионные процессы в рудничной атмосфере.

Таким образом, основными причинами низких концентраций газа на исходящих струях рудников являются закладываемые при расчете запасы количества подаваемого свежего воздуха в виде коэффициентов неравномерности, а также утечки воздуха, обеспечивающие разбавление отработанного воздуха свежим по пути его движения. Фактически избыточно подаваемый воздух, компенсирующий неравномерность его распределения, является неиспользуемым свежим воздухом, величина которого известна. Утечки

являются также неиспользуемым свежим воздухом, его количество необходимо минимизировать, но в условиях действующих рудников это не представляется возможным.

Таким образом, можно выделить следующие причины, приводящие к снижению уровня концентрации газов в исходящей струе воздуха:

1. Наличие коэффициентов запаса к расчету количества воздуха, изначально обеспечивающих разбавление образуемых вредных и горючих примесей до значений ниже предельно допустимых концентраций.
2. Внутренние утечки воздуха, приводящие к разбавлению исходящей струи воздуха по мере ее движения от рабочих зон по выработкам главных направлений.
3. Влияние диффузионных процессов, приводящих к снижению пиковых концентраций газа в моменты газовыделения, на общий постоянно подаваемый расход воздуха. По сути, диффузионный механизм позволяет использовать нестационарный характер газовыделений, так как расчет требуемого количества воздуха производится по максимальному фактору в предположении постоянства его действия.

Повысить эффективность проветривания возможно за счет применения частичного повторного использования воздуха, путем задействования воздуха утечек и учета всех механизмов снижения концентраций газов в исходящей струе воздуха. Для оценки целесообразности применения данного мероприятия необходимо провести исследования величины внутренних утечек воздуха на рудниках различных типов и процессов диффузионного перемешивания газов. В следующих разделах работы каждый из этих факторов будет исследован более подробно.

#### **2.4. Натурные исследования внутренних утечек на подземных рудниках**

Как было показано выше, одним из определяющих газовый состав исходящих струй воздуха, являются внутренние утечки, приводящие к разжижению газовых примесей. В связи с этим в работе выполнены натурные исследований утечек воздуха в системах вентиляции действующих рудников.

В системе проветривания любого рудника или шахты присутствуют утечки воздуха. Утечки воздуха делятся на внешние (поверхностные) и внутренние (подземные). Внешние утечки оказывают негативное влияние на эффективность работы главной вентиляционной установки и качество проветривания рудника в целом, но при поступлении в рудник достаточного количества воздуха не оказывают влияния на проветривание рабочих зон. Внутренние утечки можно разделить на несколько категорий, это утечки в

околоствольном дворе, в выработках главных направлений или горизонтов и участковые [39]. Количество внутренних утечек зависит от схемы проветривания, способа подготовки и порядка отработки, однако не меньшее влияние на величину утечек оказывает качество возводимых вентиляционных сооружений и другие факторы, такие как некачественное планирование горных работ или схем проезда транспорта и т.п. Результаты натурных исследований газового состава рудничной атмосферы показали, что одним из основных факторов, влияющих на величину концентрации газов на исходящей струе, являются внутренние утечки воздуха. Для определения фактической величины внутренних утечек и факторов, влияющих на их количество, на рудниках с различными системами проветривания проведены натурные исследования. В таблице 2.5 приведены основные характеристики вентиляционных систем исследуемых рудников.

Таблица 2.5 — Характеристики систем проветривания исследуемых рудников

	Схема проветривания	Способ подготовки	Система разработки	Способ проветривания
БКПРУ-4	Центральная	Полевой	Камерная с оставлением ленточных целиков	Всасывающий
СКРУ-3				
БКПРУ-2				
СКРУ-1	Фланговая	Полевой		Комбинированный
Ангидрит		Пластовый		
Известняков		Пластовый		
Заполярный		Полевой	Этажная с полным обрушением	Комбинированный
Маяк			Камерная с полной закладкой	Всасывающий
Скалистый			Слоевая с полной закладкой	
Таймырский	Слоевая и камерная с полной закладкой			
Октябрьский				
Комсомольский				

Полный комплекс натурных исследований выполнен с помощью следующих измерительных приборов:

- крыльчатый анемометр АПР-2, производства фирмы «Экотехинвест» (абсолютная погрешность измерения  $\pm(0,1+0,05 \cdot v)$  м/с);
- дальномер DISTO™ D2 производства фирмы Leica (абсолютная паспортная погрешность измерения  $\pm 0,0015$  м).

Количество внутренних утечек определяется как:

$$Q_{\text{вн.ут}} = Q_{\text{под}} - Q_{\text{исп}}, \quad (2.10)$$

где  $Q_{\text{вн.ут}}$  — количество внутренних утечек,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_{\text{под}}$  — количество воздуха, подаваемое для проветривания,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_{\text{исп}}$  — количество воздуха, используемое для проветривания,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Коэффициент внутренних утечек рассчитывается из выражения:

$$K_{\text{ут}} = \frac{Q_{\text{руд}}}{Q_{\text{руд}} - \sum Q_{\text{вн.ут}}}, \quad (2.11)$$

где  $Q_{\text{руд}}$  — количество воздуха, подаваемое для проветривания рудника,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Результаты натуральных измерений величины внутренних утечек приведены на рисунке 2.25.



Рисунок 2.25 — Величина внутренних утечек на рудниках

В результате натуральных исследований установлено, что величина внутренних утечек варьируется от 17% до 63%, а именно, величина коэффициента внутренних утечек для рудников Верхнекамского месторождения варьируется от 1,248 до 1,544, на рудниках Норильского района от 1,76 до 2,66 и на рудниках Талнахского месторождения от 1,2 до 1,52. Из таблицы 2.5 можно сделать вывод, что прямая зависимость коэффициента утечек от схемы проветривания, способа проветривания и системы разработки, которая определяет порядок ведения подготовительных работ, не выявлена. Наибольшее влияние на величину утечек оказывают организационные факторы, такие как качество вентиляционных сооружений, своевременность их возведения и другие, таким образом полностью исключить внутренние утечки не представляется возможным. Так как наличие

внутренних утечек воздуха оказывает влияние на концентрацию газа на исходящей струе, их необходимо учитывать при расчете требуемого количества воздуха, особенно если воздух утечек имеет ненулевую концентрацию вредных примесей, как в случае применения рециркуляционных систем.

## 2.5. Исследование влияния внутренних утечек на возможность рециркуляционного проветривания

На начальном этапе разработки методики расчета требуемого количества воздуха следует рассмотреть вопрос газового баланса системы проветривания. Представим рециркуляционный контур, включающий одну рабочую зону, постоянный по времени действия и мощности источник газовой выделений, а также утечки воздуха известной величины. При этом подразумевается, что в данной рабочей зоне определяющим для расчета количества воздуха является газовый фактор, а к рециркуляционному контуру за счет общешахтного проветривания обеспечивается подача свежего воздуха (Рисунок 2.26).

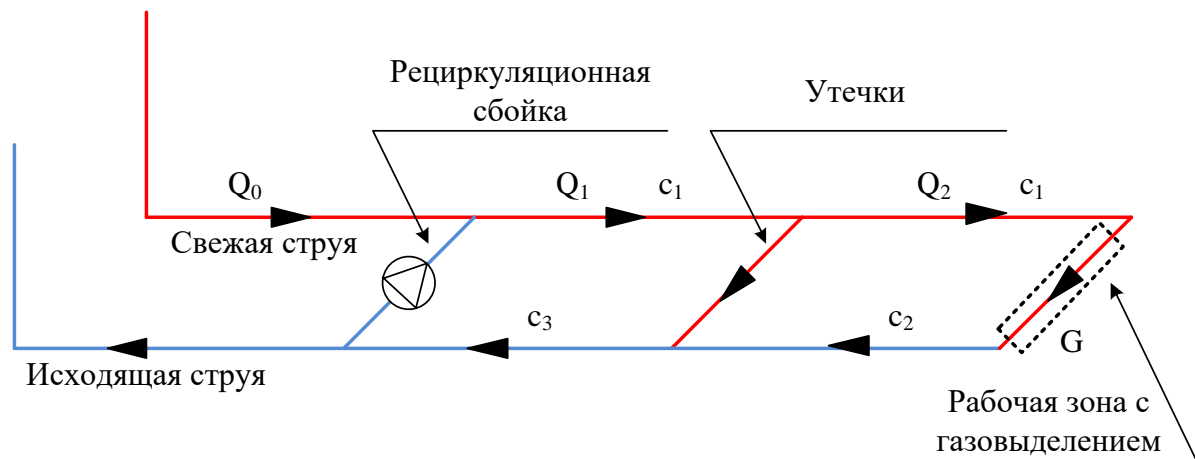


Рисунок 2.26 — Расчетная схема рециркуляционного контура

При решении задачи помимо известной газообильности считается заданным распределение расходов, поэтому их формирование не рассматривается в рамках настоящего исследования. Также предполагается, что выделение газов и их примешивание к воздушной струе не приводит к образованию существенной газовой депрессии, способной повлиять на перераспределение расходов воздуха в вентиляционной сети рассматриваемого участка рудника [12]. В таком случае система уравнений, описывающих газовый баланс в рециркуляционном контуре, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} c_3 \cdot (Q_1 - Q_0) = c_1 \cdot Q_1 \\ c_2 = c_1 + \frac{G}{Q_2} \\ c_1 \cdot (Q_1 - Q_2) + c_2 \cdot Q_2 = c_3 \cdot Q_1 \end{cases}, \quad (2.12)$$



где  $c_1$  – концентрация газа в свежей струе после рециркуляционной сбойки,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $c_2$  – концентрация в исходящей струе после газовыделения рабочей зоны,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $c_3$  – концентрация газа в исходящей струе после разбавления утечками воздуха,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $Q_0$  – расход свежего воздуха, поступающего в рециркуляционный контур,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_1$  – расход воздуха в рециркуляционном контуре,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_2$  – расход воздуха, поступающего на проветривание рабочей зоны,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $G$  – газообильность рабочей зоны,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Решая приведенную систему уравнений (2.12) относительно искомых величин концентраций газа, получим следующее решение:

$$\begin{aligned} c_1 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0}, \\ c_2 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0} + \frac{G}{Q_0}, \\ c_3 &= \frac{G}{Q_0}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Приведенное выражение для определения  $c_3$  соответствует уравнению №3 в системе (2.12). Если решать его с учетом уравнений № 1 и № 2 системы, то получим приведенное решение (2.13). Полученный вид для конечной концентрации имеет наглядное объяснение, концентрация  $c_3$  это конечная концентрация, которую будет иметь газ в исходящей струе и в рециркуляционной сбойке. Исходящая струя на схеме, приведенной на рисунке 2.26, это единственная ветвь, по которой выносится весь газ, образуемый в рассматриваемой системе. В конечном состоянии, когда в системе все концентрации устанавливаются, а именно такой случай соответствует рассматриваемой задаче и постановке (2.12), наступает массовый баланс, когда весь образуемый в системе газ  $G$ , выносится исходящей струей с расходом  $Q_0$  и концентрацией  $c_3$ . Таким образом, должно выполняться условие  $G = c_3 \cdot Q_0$  и полученное решение полностью ему соответствует.

С использованием следующих определений коэффициентов утечек  $K_{\text{ут}}$  и рециркуляции  $K_{\text{рец}}$ :

$$\begin{aligned} K_{\text{ут}} &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \\ K_{\text{рец}} &= \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

полученные решения можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} c_1 &= K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0}, \\ c_2 &= \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}})} \cdot \frac{G}{Q_0}, \\ c_3 &= \frac{G}{Q_0}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Можно отметить, что в режиме установившегося газораспределения концентрация газа в исходящей струе из контура не зависит ни от коэффициента рециркуляции, ни от коэффициента утечек. Это соответствует известному выводу о том, что концентрация газа зависит только от общего газовыделения и расхода свежего воздуха [60, 40, 93]. Полученные решения (2.15) позволяют выполнить анализ минимально требуемого количества свежего воздуха, необходимого для подведения к рециркуляционному контуру в зависимости от коэффициента рециркуляции, утечек и интенсивности газовыделения.

Согласно основному принципу расчета требуемого количества воздуха, после источника газовыделения на исходящей вентиляционной струе концентрация газа не должна быть больше некоторого предельного значения  $c_{\text{ПДК}}$ . В данном случае предполагается, что предельная концентрация газа выбрана таким образом, что в ней уже содержится необходимый технический запас и выбранное значение является целевым. В такой постановке должно выполняться следующее неравенство:

$$\frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}})} \cdot \frac{G}{Q_0} \leq c_{\text{ПДК}}. \quad (2.16)$$

Решая полученное неравенство относительно минимально требуемого расхода, получаем следующее выражение для его определения:

$$Q_0 \geq \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}})} \cdot \frac{G}{c_{\text{ПДК}}}. \quad (2.17)$$

Данное неравенство определяет допустимый диапазон расходов свежего воздуха, подводимого к рециркуляционному контуру, при котором обеспечивается разжижение газов до предельно допустимой концентрации при наличии утечек воздуха и рециркуляции вне зависимости от особенностей шахты или рудника, и одинаково применимо как для горючих, так и для ядовитых газов. Важной особенностью полученного выражения является то, что расчет подводимого количества свежего воздуха корректируется не только с учетом внутренних утечек воздуха, но и наличия рециркуляции в вентиляционной сети. Можно считать, что первый множитель в правой части неравенства (2.17) является коэффициентом запаса к требуемому количеству воздуха, рассчитанному для проветривания рабочей зоны по фактору разжижения вредных газов. Этот коэффициент запаса помимо традиционного учета утечек воздуха по пути движения воздуха включает в себя также информацию о рециркуляции и имеет следующий вид:

$$K_3 = \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}})}. \quad (2.18)$$

Для анализа полученной зависимости (2.18) на рисунке 2.27 построены графики изменения коэффициента запаса в зависимости от величины утечек и коэффициента рециркуляции.

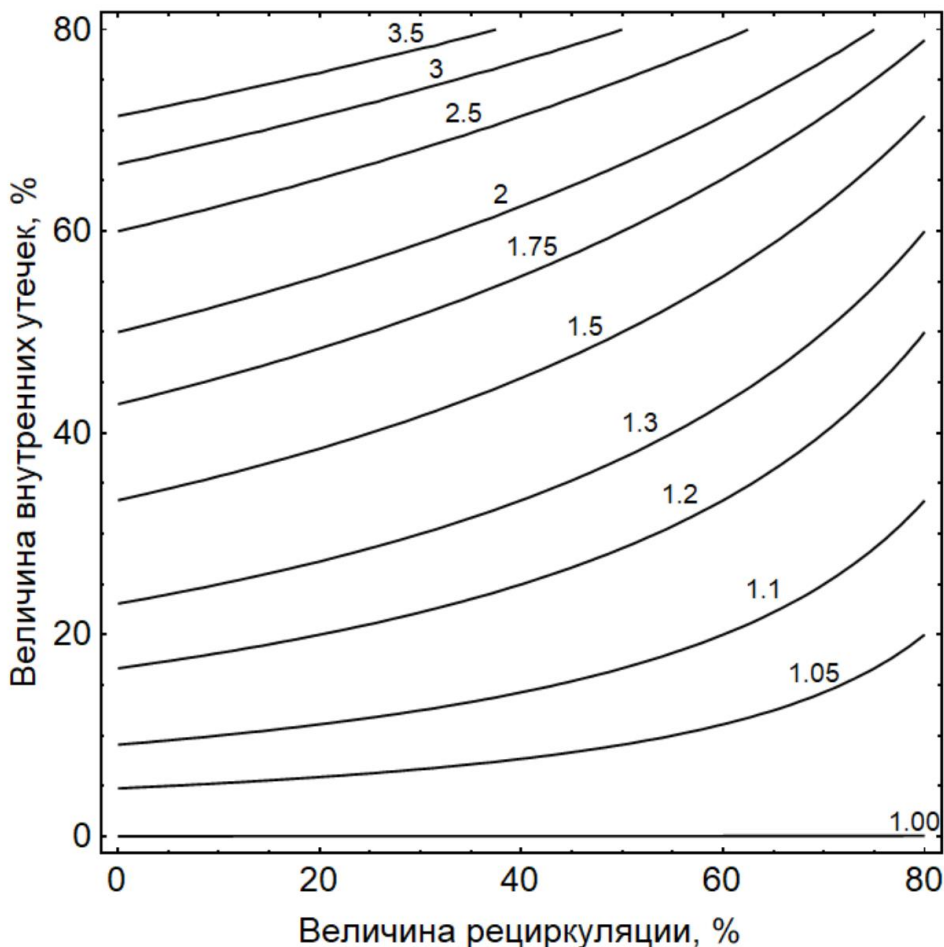


Рисунок 2.27 — Изолинии коэффициента запаса к требуемому расходу воздуха как функции от величин внутренних утечек и рециркуляции

Установлено, что чем выше внутрирудничные утечки воздуха, тем эффективнее рециркуляция с точки зрения возможности снижения подачи избыточного количества свежего воздуха. Это видно по уменьшению коэффициента запаса при перемещении на рисунке 2.27 вдоль некоторой линии постоянных утечек параллельно оси абсцисс слева направо. Также в результате анализа определения величины коэффициента запаса к расчету требуемого количества воздуха (формула 2.18) видно, что при отсутствии утечек воздуха и постоянном характере газовыделения в рабочей зоне применение рециркуляционного проветривания бессмысленно. Физически это объясняется тем, что механизм действия рециркуляции заключается в задействовании утечек для разжижения газов. То есть, часть утечек вовлекается в воздухообмен в рабочей зоне. Если утечки отсутствуют, то независимо от степени рециркуляции обеспечить снижение количества подаваемого

воздуха за счет средств общешахтной вентиляции невозможно, так как концентрация газов на исходящей струе инвариантна относительно коэффициента рециркуляции.

Так как по условиям приведенных исследований газовый фактор является определяющим, следует отдельно рассмотреть газовую обстановку в рабочей зоне. Очевидно, что количество воздуха, подаваемое для проветривания рабочей зоны, должно быть увеличено, так как при применении рециркуляции поступающий в рабочую зону воздух имеет ненулевую начальную концентрацию газа. Таким образом, расчетное количество свежего воздуха, подаваемое на проветривание рабочей зоны равно:

$$Q_2 = \frac{(1 - K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{рец}})} \cdot \frac{G}{c_{\text{ПДК}}}. \quad (2.19)$$

А расчетное количество воздуха, подаваемое на проветривание рабочей зоны с учетом рециркуляционного проветривания и ненулевой концентрации газов в поступающем воздухе должно рассчитываться следующим образом:

$$Q_{\text{РЗ}} = \frac{Q_{\text{РЗ}}|_{c=0}}{(1 - K_{\text{рец}})}, \quad (2.20)$$

где  $Q_{\text{РЗ}}|_{c=0}$  – количество воздуха, необходимое для проветривания рабочей зоны в предположении отсутствия повторного использования воздуха.

Если же, например, газовыделение имеет непостоянный характер, имеют место сорбционные процессы или газовый фактор для расчета количества воздуха не является определяющим, то с учетом современных средств автоматического управления проветриванием [32] для энергосбережения целесообразно снижать подачу свежего воздуха — математически это эквивалентно уменьшению газовыделения в выражении (2.17). При этом если рассмотреть рециркуляцию с точки зрения фактора расчета по минимальной скорости движения воздушной струи должно выполняться условие:

$$\frac{(1 - K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{рец}})} \cdot Q_0 > Q_{\text{min}}, \quad (2.21)$$

где  $Q_{\text{min}}$  – расход воздуха, соответствующий минимальной допустимой скорости движения воздуха в выработке. В таком случае требование к минимальной концентрации исходящей струи отсутствует, а значит коэффициентом рециркуляции можно неограниченно компенсировать утечки внутри рециркуляционного контура, при этом отсутствует необходимость корректировки расчетного количества воздуха, подаваемого в рабочую зону.

Зачастую на рудниках возникают ситуации, когда на одном добычном участке или направлении находятся потребители воздуха с разными определяющими факторами. В

такой ситуации расчет количества воздуха при применении рециркуляции будет иметь некоторые особенности [11].

Рассмотрим упрощенную ситуацию, когда на одном направлении расположены две рабочие зоны, при этом определяющим фактором проветривания для рабочей зоны №1 является газовый фактор, а для рабочей зоны №2 фактор минимальной скорости движения воздушной струи. Решение поставленной задачи осуществляется на основе совершенствования математической модели газового баланса в рециркуляционном контуре. Для этого в модели рассматривается не одна рабочая зона с источником газовой выделений, а две рабочие зоны, в одной из которых действует газовый фактор (присутствует источник газовой выделений), а в другой есть требование по поддержанию минимально необходимого расхода воздуха (фактор минимальной скорости воздуха). Схема представлена на рисунке 2.28.

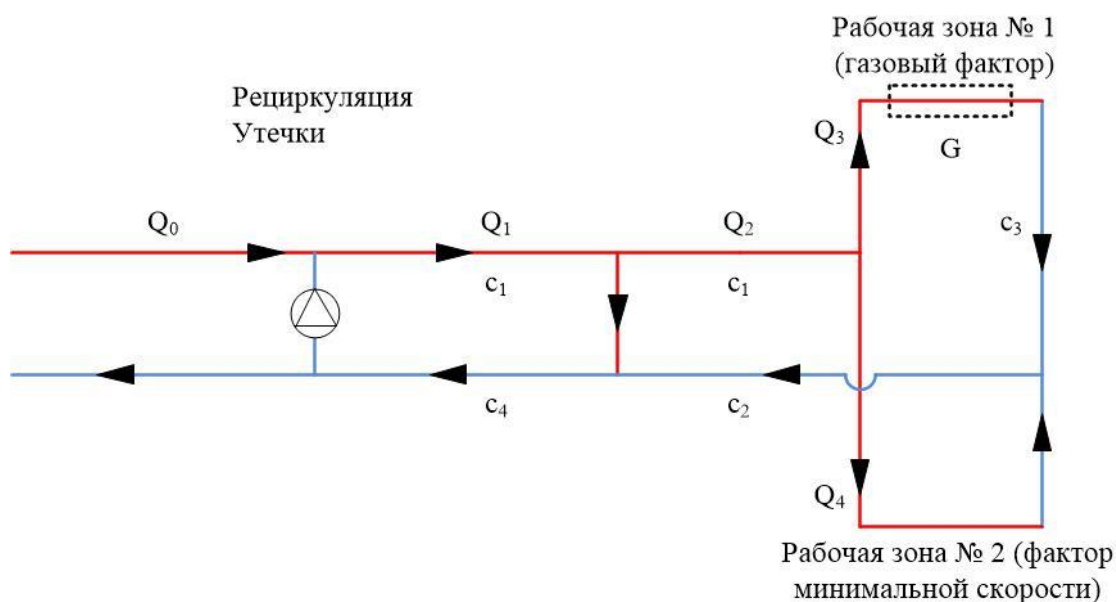


Рисунок 2.28 — Схематичное изображение рециркуляционной системы проветривания с двумя рабочими зонами

Считается, что распределение расходов задано и изменение подачи свежего или рециркуляционного воздуха не происходит, распределение расходов воздуха внутри контура не меняется. Также предполагается, что концентрации газов малы, поэтому объемный расход воздуха в ветви определяется только воздушной средой. Для удобства вводятся следующие наименования рабочих зон: рабочая зона №1 с действующим фактором газовой выделений и рабочая зона №2 с фактором минимального расхода воздуха.

Система уравнений, описывающая распределение газа в такой сети, будет иметь вид:

$$\begin{cases} c_1 \cdot Q_1 - c_4 \cdot (Q_1 - Q_0) = 0 \\ c_3 - c_1 - \frac{G}{Q_3} = 0 \\ c_3 \cdot Q_3 + c_1 \cdot Q_4 - c_2 \cdot Q_2 = 0 \\ c_1 \cdot (Q_1 - Q_2) + c_2 \cdot Q_2 - c_4 \cdot Q_1 = 0 \end{cases}, \quad (2.22)$$

где  $c_1$  – концентрация газа в свежей струе после рециркуляционной сбойки,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $c_2$  – концентрация в исходящей струе на выходе из рабочих зон,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $c_3$  – концентрация в исходящей струе рабочей зоны № 1,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $c_4$  – концентрация газа в исходящей струе после разбавления утечками воздуха,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $Q_0$  – расход свежего воздуха, поступающего в рециркуляционный контур,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_1$  – расход воздуха в рециркуляционном контуре,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_2$  – расход воздуха, поступающего на проветривание рабочих зон,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_4$  – расход воздуха, поступающего на проветривание рабочей зоны № 2,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $G$  – газообильность рабочей зоны № 1,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Решая приведенную систему уравнений (2.22) относительно искомым величин концентраций газа, получим следующее решение:

$$\begin{aligned} c_1 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0}, \\ c_2 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0} + \frac{G}{Q_3 + Q_4}, \\ c_3 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0} + \frac{G}{Q_3}, \\ c_4 &= \frac{G}{Q_0}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Для удобства анализа введем коэффициенты коэффициент утечек  $K_{\text{ут}}$ , рециркуляции  $K_{\text{рец}}$  и коэффициент распределения воздуха между рабочими зонами:

$$\begin{aligned} K_{\text{ут}} &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \\ K_{\text{рец}} &= \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1}, \\ K_{\text{рз}} &= \frac{Q_3}{Q_2}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

С учетом введенных обозначений полученные решения для концентраций газа можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} c_1 &= K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0}, \\ c_2 &= \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}})} \cdot \frac{G}{Q_0}, \\ c_3 &= K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} + \frac{(1 - K_{\text{рец}}) \cdot G}{K_{\text{рз}} \cdot (1 - K_{\text{ут}}) \cdot Q_0}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Из полученного решения концентрации газов в исходящей струе рабочих зон определяются следующими выражениями:

$$c_{P31} = K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} + \frac{(1 - K_{\text{рец}}) \cdot G}{K_{P3} \cdot (1 - K_{\text{ут}}) \cdot Q_0}, \quad (2.26)$$

$$c_{P32} = K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0}.$$

Из вида полученных выражений следует, что концентрация газа на входе в рабочие зоны зависит только от суммарного газовыделения внутри рециркуляционного контура, количества свежего воздуха и коэффициента рециркуляции. В рабочей зоне с отсутствующим газовыделением концентрация газа не меняется. В рабочей зоне с газовыделением наблюдается ее прирост в зависимости от количества подаваемого в нее воздуха. Это количество определяется общим объемом свежего воздуха, коэффициентами рециркуляции и утечек, а также распределением воздуха между рабочими зонами.

Полученные выражения позволяют определить расчетные количества воздуха исходя из условий, что в рабочей зоне с фактором газовыделения не должно быть превышения концентрации газов на исходящей струе, а рабочей зоне с фактором минимальной скорости должен обеспечиваться минимальный расход. То есть должны выполняться условия:

$$K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} + \frac{(1 - K_{\text{рец}}) \cdot G}{K_{P3} \cdot (1 - K_{\text{ут}}) \cdot Q_0} \leq c_{\text{пдк}}, \quad (2.27)$$

$$Q_4 \geq Q_{\text{min}}.$$

На основе выражений (2.14) и (2.27) возможно провести анализ изменения газораспределения в рабочих зонах при различных вариантах перераспределения воздуха, утечек и рециркуляции. Для расчета приняты следующие исходные данные: мощность газовыделения в рабочей зоне №1 1 м<sup>3</sup>/с, предельно допустимая концентрация 2 %, минимально необходимый расход в рабочей зоне №2 50 м<sup>3</sup>/с.

Далее для анализа рассмотрены следующие варианты распределения расходов для обеспечения заданных условий проветривания рабочих зон, при которых не наблюдается превышения предельно допустимой концентрации газов и обеспечивается расход не меньше минимального:

1. Отсутствуют утечки воздуха и рециркуляционное проветривание.
2. Присутствуют утечки воздуха в количестве 50 %, но отсутствует рециркуляционное проветривание.
3. Присутствуют утечки воздуха в количестве 50 %, но есть рециркуляционное проветривание с коэффициентом 50 %, при этом нет возможности перераспределения

воздуха между рабочими зонами. Регулирование осуществляется только за счет изменения подачи свежего воздуха.

4. Присутствуют утечки воздуха в количестве 50 %, но есть возможность регулировать количество рециркулируемого воздуха и перераспределение между рабочими зонами.

Результаты расчетов по данным вариантам представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 — Результат расчета количества воздуха по вариантам

Параметр	Вар. № 1	Вар. № 2	Вар. № 3	Вар. № 4
Расход свежего воздуха, м <sup>3</sup> /с	100	200	125	110
Расход на рециркуляцию, м <sup>3</sup> /с	0	0	125	125
Коэффициент рециркуляции, %	0	0	50	53
Коэффициент утечек, %	0	50	50	50
Количество утечек, м <sup>3</sup> /с	0	100	125	117,5
Концентрация газа на входе в рабочие зоны, %	0	0	0,4	0,5
Рабочая зона № 1				
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	50	50	62,5	70
Расчетный расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	50	50	62,5	66,5
Мощность выделения газа, м <sup>3</sup> /с	1	1	1	1
Концентрация на выходе, %	2	2	2	1,98
Рабочая зона № 2				
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	50	50	62,5	50,5
Расчетный расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	50	50	50	50
Концентрация на выходе %	0	0	0,4	0,4
Распределение между рабочими зонами	0,5	0,5	0,5	0,57

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что рабочие зоны несимметричны относительно влияния рециркуляционного проветривания. При возникновении рециркуляционного контура появляется возможность снизить подачу свежего воздуха за счет той части расходов, которая не участвует в разбавлении вредных примесей от источников. При этом подача воздуха на рабочую зону, где газовый фактор не является определяющим, также увеличивается и возникает ситуация с подачей избыточного количества воздуха. Таким образом, для большей эффективности рециркуляционного



проветривания целесообразно перераспределить воздух между рабочими зонами и большую часть подать на рабочую зону с рециркуляцией, где газовый фактор является определяющим. Поэтому возникает задача поиска необходимого распределения расходов воздуха между рабочими зонами при действии различных факторов. Для этого разрешим неравенство (2.27) относительно коэффициента распределения воздуха между рабочими зонами:

$$K_{PЗ} = \frac{G}{\left(c_{ПДК} - K_{рец} \cdot \frac{G}{Q_0}\right) Q_{min}}. \quad (2.28)$$

Можно заметить, что полученное выражение есть отношение расчетных количеств воздуха по различным факторам с учетом того факта, что за счет рециркуляции воздух, подаваемый на проветривание рабочих зон, имеет начальную концентрацию газов.

Также можно отметить, что расход воздуха, проходящий через рабочую зону №2 не участвует в разбавлении газов от источника непосредственно, и с точки зрения газораспределения идентичен утечкам воздуха на схеме. В связи с этим, для определения возможности снижения подачи свежего воздуха необходимо учитывать суммарное количество воздуха, не проходящего через источники газовыделения.

Полученные результаты можно расширить на общий случай, когда имеются несколько обособленно проветриваемых рабочих зон внутри рециркуляционного контура. У каждой рабочей зоны есть газообильность и минимально требуемое количество воздуха. Кроме того, есть общие утечки воздуха в пределах контура.

В таком случае полученное решение (2.25) и (2.26) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} c_1 &= K_{рец} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{Q_0}, \\ c_2 &= \frac{(1 - K_{рец} \cdot K_{ут}) \cdot \sum_{i=1}^N G_i}{(1 - K_{ут}) \cdot Q_0}, \\ c_3 &= K_{рец} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{Q_0} + \frac{(1 - K_{рец}) \cdot \sum_{i=1}^N G_i}{K_{PЗ} \cdot (1 - K_{ут}) \cdot Q_0}, \\ c_{PЗi} &= K_{рец} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{Q_0} + \frac{(1 - K_{рец}) \cdot G_i}{K_{PЗi} \cdot (1 - K_{ут}) \cdot Q_0}, \end{aligned} \quad (2.29)$$

где  $K_{PЗi}$  – доля воздуха, поступающего на проветривание  $i$ -ой рабочей зоны.

Методика определения параметров рециркуляционного проветривания рабочих зон будет иметь следующий вид. На начальном этапе, в зависимости от общего количества газовыделения в рабочих зонах, рассчитывается минимально требуемое количество

воздуха из условия недопустимости превышения предельно допустимой концентрации на общей исходящей струе, то есть:

$$Q_0 = \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{эф}})}{(1 - K_{\text{эф}})} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{C_{\text{ПДК}}}. \quad (2.30)$$

Важно отметить, что в выражении использован эффективный коэффициент утечек, учитывающий не только тот объем воздуха, который не доходит до рабочих зон, но и воздух, проветривающий рабочие зоны, но не участвующий в разжижении газовых примесей:

$$K_{\text{эф}} = \frac{Q_1 - Q_2 - \sum_{i=1}^N Q_{\text{мин}}}{Q_1}. \quad (2.31)$$

При этом в каждую рабочую зону по газовому фактору должна обеспечиваться подача количества воздуха в объеме не менее:

$$Q_{\text{РЗ}i} = \frac{G_i}{C_{\text{ПДК}} \cdot (1 - K_{\text{ут}})}. \quad (2.31)$$

А по фактору минимальной скорости количество воздуха определяется аналогично тому, как это принято без учета рециркуляции:

$$Q_{\text{РЗ}i} = S_i \cdot v_{\text{мин}}. \quad (2.32)$$

Также необходимо отметить, каким образом следует определять коэффициент рециркуляции в выражении (2.30). Поскольку было установлено, что при увеличении коэффициента рециркуляции не происходит увеличения максимальных концентраций газа в сети горных выработок, фактор газовыделения в непосредственном виде не ограничивает коэффициент рециркуляции. С другой стороны, поскольку источник тяги в рециркуляционном контуре работает в параллели с вентиляторными установками общешахтного проветривания, увеличение его напора и интенсивности рециркуляции может привести к снижению подачи свежего воздуха к контуру, что создает риск создания потери устойчивости проветривания контура в целом, вплоть до прекращения подачи свежего воздуха. Это создает риск неконтролируемой рециркуляции и накопления газовой примеси в контуре [69]. Таким образом, коэффициент рециркуляции должен быть ограничен из соображений обеспечения устойчивой подачи свежего воздуха к рециркуляционному контуру.

В результате проведенных исследований разработана модель течения газовой смеси в системе горных выработок подземного рудника, образующих рециркуляционный контур, с учетом влияния утечек воздуха в системе и факторов проветривания рабочих зон и предлагается новый подход к расчету количества воздуха, который более полно учитывает особенности систем проветривания и является универсальным.

Таблица 2.7 — Характеристики традиционного и предлагаемого подходов к расчету количества воздуха

	Традиционный подход	Предлагаемый
Факторы обоснования возможности рециркуляционного проветривания	Непостоянный характер газовыделения в рабочих зонах Процессы сорбции газов внутри контура рециркуляции	Наличие утечек внутри рециркуляционного контура
Область применимости	Калийные рудники	Рудники любого типа
Расчет требуемого количества свежего воздуха	Снижение на величину повторно используемого воздуха	Расчет с учетом коэффициента рециркуляции и утечек
Расчет требуемого количества рабочей зоны по газовому фактору	Не зависит от коэффициента рециркуляции	Зависит от коэффициента рециркуляции

Таким образом, рециркуляционное проветривание может быть эффективным способом использования внутрирудничных утечек воздуха для снижения объема подачи свежего воздуха за счет главных вентиляторных установок для шахт и рудников любого типа.

## 2.6. Выводы

В данной главе разработана методика проведения замеров аэродинамических параметров вентиляционных сетей и газового состава рудничного воздуха, на основании полученных экспериментальных данных сделаны следующие выводы:

- концентрации горючих и взрывоопасных газов на исходящих струях рабочих зон, панелей, направлений и горизонтов калийных рудников ПАО «Уралкалий» и полиметаллических рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» не превышают предельно-допустимых значений;
- превышение концентраций газов выше допустимых значений происходит в ситуациях, связанных с нарушениями проветривания (недостаточная подача свежего воздуха);
- концентрация газа на исходящей струе при постоянном характере действия источника газовой выделению зависит от количества подаваемого свежего воздуха и величины внутренних утечек воздуха;
- при расчете требуемого количества воздуха закладываются запасы на неравномерность распределения воздушных потоков, также при движении отработанного

- воздуха, его перемешивания со свежим воздухом утечек, происходит разбавление, это является основной причиной снижения концентрации газов на исходящей струе;
- величина внутренних утечек варьируется в пределах 17% до 63% вне зависимости от схемы проветривания, способа подготовки и порядка отработки;
  - разработан раздел методики расчета требуемого количества воздуха в части определения максимального количества повторно используемого воздуха, включающая коэффициент запаса на подачу воздуха на проветриваемый участок за счет общешахтного проветривания, учитывающего утечки воздуха и рециркуляционное проветривание;
  - установлено, что при применении рециркуляционного проветривания необходимо увеличивать расчетное количество воздуха для рабочих зон, проветриваемых по газовому фактору, по причине наличия начальной концентрации газов в воздухе, поступающем на проветривание.
  - качество воздуха на исходящих струях позволяет сделать вывод о возможности его повторного использования на рудниках любого типа.

Таким образом, в результате выполненных исследований установлены существенные резервы систем вентиляции действующих рудников на основании качественного состава рудничной атмосферы исходящих струй воздуха.

Однако для возможности их интерпретации и прогнозирования необходимо развитие программных инструментов моделирования газораспределения в сети горных выработок с учетом конвективного и диффузионного механизмов переноса газовых примесей, которые также будут необходимы при обосновании параметров частичного повторного использования исходящих вентиляционных потоков.

### **3. РАЗРАБОТКА КОНВЕКТИВНО-ДИФФУЗИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

В настоящее время расчет конвективно-диффузионного переноса вредных примесей описан в литературе применительно к одной или нескольким горным выработкам заданной топологии, тогда как расчет конвективного переноса вредных примесей описан в литературе в достаточно полной сетевой постановке [30] и реализован в аналитическом комплексе «АэроСеть» [51], где применительно к расчету газораспределения в сети горных выработок используется модель идеального вытеснения. Использование модели идеального вытеснения, описывающей конвективный перенос, правомерно для штрекообразных выработок при соблюдении двух условий. Во-первых, длина горных выработок должна быть значительно больше их поперечного размера, во-вторых, скорость движения воздуха должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить существенное превалирование процессов вытеснения над процессами турбулентной диффузии и вихревой дисперсии примеси.

Преимущество данного подхода — его простота и возможность оперативного расчета для вентиляционных сетей, состоящих даже из нескольких тысяч ветвей. Тем не менее подход имеет и слабую сторону, поскольку не учитывает ни турбулентную диффузию, ни дисперсию примеси, существенные в горных выработках с низкой скоростью воздуха, которые, как правило, присутствуют в реальности и в достаточно детализированных моделях вентиляционных сетей рудников. В связи с этим возникает нефизичное поведение вредных примесей в горных выработках с низкой скоростью воздуха, которые, как правило, присутствуют в детализированных моделях вентиляционных сетей рудников. Например, в сбойках с перемычками из-за низкой скорости воздуха вредные примеси могут задерживаться на достаточно длительное время, достигающее нескольких часов, в то время как в смежных с ними выработках все вредные примеси удаляются сравнительно быстро.

Несмотря на проработанную общую методологию моделирования распространения вредных примесей (как пассивных, так и активных), остаются нерешенными некоторые частные вопросы, связанные с программной реализацией моделей конвективно-диффузионного переноса вредных примесей в вентиляционных сетях произвольной топологии. Например, выбор расчетной формулы для эффективного коэффициента продольной дисперсии (диффузии) с учетом влияния скоростей потока в соседних горных выработках, анализ особенностей перемешивания вредных примесей на сопряжениях горных выработок, возможность оперативного расчета переноса вредных примесей с учетом как

конвективных, так и диффузионных процессов. Именно этим вопросам посвящена данная глава.

### 3.1. Математическая постановка задачи расчета газораспределения в сети горных выработок

В данном разделе рассматривается расчет переноса вредных примесей в системах горных выработок рудников произвольной топологии за исключением тупиковых выработок. Решение задачи газораспределения выполняется в одномерной постановке, при расчете предполагается, что на распространение газовых примесей не оказывают влияния тепловые депрессии, а газовыделения не влияют на перераспределение воздушных потоков. Это применимо в большинстве практических случаев, за исключением некоторых частных ситуаций, когда концентрация газа достаточно велика и начинает действовать эффект “газовой” депрессии [116].

Расчет распределения вредных примесей неразрывно связан с расчетом воздушных потоков в вентиляционных сетях шахт и рудников. Для решения задачи распространения газов в горных выработках необходимо знать среднюю скорость воздушного потока в каждой выработке. Для этого в рудничной вентиляции решается система уравнений, образованная 1-м и 2-м правилами Кирхгоффа [52]:

$$\sum_{i \in A_j} Q_i U_{ij} = 0, \quad (3.1)$$

$$\sum_{i \in C_k} (R_i Q_i |Q_i| - H_i) Y_{ik} = 0, \quad (3.2)$$

где  $Q_i$  — расход воздуха в ветви  $i$ , м<sup>3</sup>/с;  $R_i$  — аэродинамическое сопротивление ветви  $i$ , Н·с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>;  $H_i$  — источник тяги (вентилятор) в ветви  $i$ , Па;  $U_{ij}$  — индикатор, равный 1, если ветвь  $i$  начинается в узле  $j$ , и  $-1$ , если ветвь  $i$  оканчивается в узле  $j$ ;  $Y_{ik}$  — индикатор, равный 1, если ветвь  $i$  сонаправлена с направлением обхода контура  $k$ , и  $-1$ , если ветвь  $i$  направлена в противоположную сторону;  $A_j$  — множество ветвей, инцидентных узлу  $j$ ;  $C_k$  — множество ветвей, входящих в контур  $k$ .

После решения системы уравнений (3.1), (3.2) одним из известных численных методов (в случае аналитического комплекса “АэроСеть” решение ищется методом контурных расходов [69]) поле средних скоростей воздушных потоков в сети горных выработках становится заданным и возможен переход ко второму этапу — решению задачи о распределении вредных примесей.

Для расчета переноса объемной концентрации вредной примеси  $C$  в горных выработках используется классическое одномерное уравнение [3].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_{cp} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + q, \quad (3.3)$$

где  $V_{cp}$  — средняя по сечению горной выработки скорость воздуха, м/с;  $D$  — эффективный коэффициент продольной дисперсии (диффузии), м<sup>2</sup>/с;  $q$  — источник вредной примеси, 1/с;  $t$  — время, с;  $x$  — координата вдоль оси горной выработки, м.

Согласование решений уравнения (3.3) между смежными друг с другом ветвями происходит по условию сохранения потока вредной примеси через общий узел. В случае сопряжения  $M$  ветвей (по  $M_{in}$  ветвям поток заходит в узел, по  $M_{out}$  ветвям поток выходит из узла), условие сохранения потока вредных примесей записывается так:

$$\sum_{i=1}^{M_{in}} \Psi_i = \sum_{j=1}^{M_{out}} \Psi_j, \quad (3.4)$$

$$\Psi = CQ - DS \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (3.5)$$

Здесь  $\Psi$  — поток вредных примесей, м<sup>3</sup>/с;  $S$  — сечение горной выработки, м<sup>2</sup>. Индекс  $i$  нумерует выработки, по которым примесь поступает в узел, а индекс  $j$  — выработки, по которым примесь покидает узел.

Система уравнений дополняется граничными условиями по концентрации вредных примесей в атмосфере ( $C_{атм}$ ) для внешних узлов (3.6), для внутренних узлов (3.7) и начальными условиями по значениям вредных примесей (3.8) в момент времени  $t = 0$ :

$$C_i(t, 0) = C_{атм}, \quad (3.6)$$

$$C_i(t, 0) = \frac{\Psi_{sum}}{Q_{sum}}, \quad (3.7)$$

$$C_i(0, x) = C_i^{(0)}(x). \quad (3.8)$$

Здесь  $C_i^{(0)}(x)$  — начальные распределения концентраций в ветвях графа вентиляционной сети;  $C_{атм}$  — концентрация газа в воздухе, поступающем из атмосферы;  $\Psi_{sum}$  — поток вредных примесей, проходящий через узел, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{sum}$  — суммарный расход воздуха, проходящий через узел, м<sup>3</sup>/с.

Следующим важным вопросом при расчете распространения газовых примесей по горным выработкам является определение коэффициента продольной дисперсии (диффузии). Коэффициент продольной дисперсии (диффузии)  $D$  включает в себя как “размывание” примеси за счет неоднородного профиля скорости потока по сечению (дисперсия), так и продольную турбулентную диффузию из-за турбулентных пульсаций скорости потока в каждой его точке. Молекулярная диффузия газовой смеси, как правило, считается пренебрежимо малой при рассмотрении турбулентных течений

воздуха в горных выработках. Она соотносится с турбулентной диффузией так же, как молекулярная вязкость с турбулентной, т. е. ниже последней на один-три порядка [3, 108].

Согласно [3], явление “размывания” примеси за счет неоднородного по сечению скоростного поля — ключевой фактор диффузионного типа при одномерном моделировании течения жидких и газообразных сред. В [3] не приводится явного метода определения коэффициента продольной дисперсии  $D$ , но упоминается, что он является функцией коэффициента аэродинамического сопротивления и числа Рейнольдса; при этом делается ссылка на [90] с эмпирической зависимостью для него применительно к горным выработкам, где авторы ссылаются на более раннюю основополагающую работу Тейлора [106], в которой получено выражение для коэффициента продольной дисперсии в круглой трубе:

$$K_{disp} = 10.06RV^*, \quad (3.9)$$

а также для коэффициента турбулентной диффузии:

$$K_{diff} = 0.05RV^*. \quad (3.10)$$

Здесь  $R$  — радиус трубы или горной выработки, м;  $V^*$  — динамическая скорость или скорость трения [7], м/с. Из (3.9) и (3.10) ясно, что дисперсия вредных примесей в турбулентном течении воздуха на три порядка выше, чем турбулентная диффузия в воздушном потоке. Это согласуется с важностью учета продольной дисперсии газовой примеси [3] и указывает на то, что при моделировании переноса примесей на прямых участках горных выработок важно учитывать именно дисперсию из-за неравномерности поля скоростей, а турбулентной и молекулярной диффузией можно пренебречь. Как правило, исследователи ограничивались общими фразами о газодинамическом расчете [109] или же без пояснения приводили формулы, схожие с формулой (3.9), в виде [83, 89, 113]:

$$d = 65.47R\sqrt{\alpha}V_{cp}, \quad (3.11)$$

или в виде [88, 110]:

$$D = 10.1\sqrt{\frac{f}{8}}V_{cp}R, \quad (3.12)$$

где  $\alpha$ ,  $f$  — коэффициент аэродинамического сопротивления и коэффициент трения, фигурирующие в законе Дарси – Вейсбаха [114].

С учетом известной связи между коэффициентом аэродинамического сопротивления и коэффициентом трения  $\alpha$  и  $f$ :

$$f = \frac{8\alpha}{\rho}. \quad (3.13)$$

Формулы (3.11) и (3.12) не соответствуют друг другу. Такое разночтение формулы (3.9), по-видимому, связано с тем, что числовой коэффициент в (3.11) получен



эмпирически, в (3.12) — из теоретических соображений. Формула (3.12) более понятна в том смысле, что в ней соблюдаются размерности левой и правой частей.

С учетом (3.12) и (3.13), а также с учетом понятия эквивалентного диаметра горной выработки можно записать выражение для определения эффективного коэффициента продольной дисперсии (диффузии):

$$D = 20.2 \sqrt{\frac{\alpha}{\rho}} V_{cp} \frac{S}{P}. \quad (3.14)$$

На рисунке 3.1 показаны изолинии эффективного коэффициента продольной дисперсии в фазовой плоскости скоростей воздушного потока и эффективных диаметров горной выработки  $d_{eff} = 4S/P$   $d_{эфф} = 4S/P$ . Принято, что плотность  $\rho$  равна  $1.2 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент  $\alpha$  —  $0.004 \text{ кг/м}^3$  (комбайновая проходка).

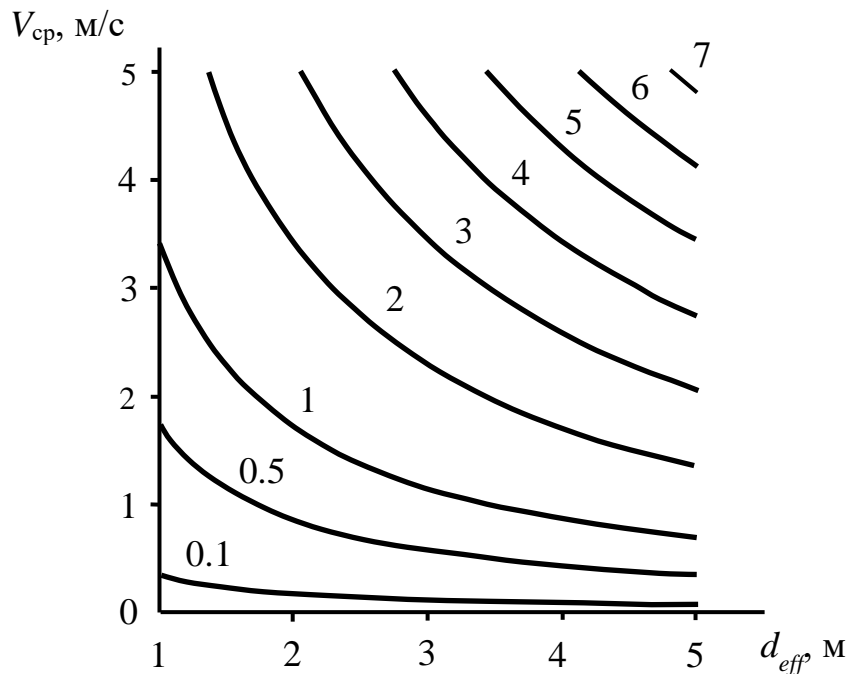


Рисунок 3.1 — Изолинии эффективного коэффициента продольной дисперсии ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) в фазовой плоскости скорости  $V_{cp}$  и эффективного диаметра  $d_{eff}$

Следует отметить, что определение эффективного коэффициента продольной дисперсии с использованием выражения (3.14) справедливо для штрекообразных выработок со значительной скоростью движения воздуха, у которых длина значительно больше их поперечного размера.

### 3.2. Разработка численного метода решения задачи расчета газораспределения в сети горных выработок

В рамках настоящего исследования для численного решения задачи о распределении вредных примесей уравнение (3.3) дискретизируется с помощью явной по времени конечно-разностной схемы (первый порядок точности по времени и второй порядок точности по пространству). Здесь и ниже индекс  $j$  будет нумеровать не узлы вентиляционного графа, а узлы конечно-разностной сетки каждой ветви; индекс  $k$  — не независимые контуры графа, а временные слои. Задается фиксированный шаг по времени  $\Delta t$ . Для каждой горной выработки определяется конечно-разностная сетка, характеризующаяся однородным шагом по пространству  $\Delta L_i$ . Он рассчитывается исходя из заданного шага по времени  $\Delta t$  и средней скорости воздушного потока  $V_i$ :

$$\Delta L_i = V_i \Delta t. \quad (3.15)$$

Индекс “ср” здесь и далее для удобства опущен. Выбор пространственного шага в формуле (3.15) позволяет существенно упростить конечно-разностную запись уравнения конвективного переноса. По этой причине именно в таком виде шаг по времени и выбирался в [30].

Общее количество узлов  $n_i$  в ветви определяется как отношение длины ветви  $L_i$  к пространственному шагу (3.15) с округлением вверх до ближайшего целого. Если скорость достаточно велика, а длина ветви мала, то возможна ситуация  $n_i = 1$ . В другом случае при очень малой скорости  $V_i$  количество узлов может стать чрезмерно большим. Это приведет к неэффективному использованию вычислительных мощностей компьютера. Целесообразно ограничить максимальное количество узлов сетки  $n_i$  некоторой величиной  $n_{max}$ , выбираемой исходя из требуемых скорости и точности расчета, и не проводить расчет конвективного переноса примесей в ветвях, где  $n_i > n_{max}$ .

В рассматриваемом случае необходимо учитывать не только конвективный перенос массы, но и диффузионный. Для увязывания конвективного и диффузионного процессов используется метод расщепления по физическим процессам [4]. В этом случае на каждой временной итерации  $k$  алгоритм распределения вредных примесей выполняет на внутренних узлах каждой ветви  $i$  два последовательных шага.

Первоначально выполняется расчет конвективного переноса газовых примесей с учетом источников выделения газа в соответствии с [30] в ячейках разбиения  $j = 2, \dots, n_i$ :

$$C_{i,j}^* = C_{i,j-1}^k + \frac{W_{i,j}^k}{Q_i}, \quad (3.16)$$

где  $C_{i,j}^*$  — промежуточное (по временному слою) узловое значение концентрации вредных примесей в узле  $j$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $C_{i,j-1}^k$  — концентрация вредных примесей в узле ( $j - 1$ ) на предыдущем временном шаге  $k$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $W_{i,j}^k$  — объемный расход выделения/поглощения вредной примеси,  $\text{м}^3/\text{с}$ . Также на этом шаге рассчитываются промежуточные значения на входных узлах ветвей:

для внутреннего (подземного) узла:

$$C_{i,1}^* = \sum_{e=1, e \neq i}^n C_{em}(t) Q_e / \sum_{e=1, e \neq i}^n Q_e, \quad (3.17)$$

для внешнего (атмосферного) узла:

$$C_{i,1}^* = 0, \quad (3.18)$$

где  $e$  — номер инцидентной узлу ветви, из которой воздушный поток поступает в первый узел ветви  $i$ ;  $n$  — общее количество ветвей, из которых воздушный поток поступает в первый узел;  $m$  — номер последнего узла в конечно-разностной сетке ветви  $e$ . Если узел — единственный узел конечно-разностной сетки ветви  $i$ , то к (3.17) и (3.18) добавляется слагаемое  $W_{i,j}^k/Q_i$ . На практике при моделировании слагаемое  $W_{i,j}^k/Q_i$  может быть принято равным некоторому приращению концентрации вредной примеси  $\Delta C_{i,j-1}^k$  после прохождения источника выделения вредности, если таковое известно.

А затем производится расчет диффузионного переноса газовых примесей на внутренних узлах  $j = 2, \dots, n_1 - 1$ :

$$C_{i,j}^{k+1} = C_{i,j}^* + s_i(C_{i,j+1}^* - 2C_{i,j}^* + C_{i,j-1}^*), \quad (3.19)$$

$$s_i = \max\left(\frac{1}{2}; D_i \frac{\Delta t}{\Delta L_i^2}\right), \quad (3.20)$$

где  $D_i$  — эффективный коэффициент продольной дисперсии (диффузии),  $\text{м}^2/\text{с}$ , определяемый по выражению (3.14).

Причем при выполнении расчета диффузионного переноса необходимо ввести дополнительные граничные условия для расчета газовой примеси:

$$C_{i,1}^{k+1} = C_{i,1}^*, \quad C_{i,n_i}^{k+1} = C_{i,n_i}^*(1 - s_i) + s_i C_{i,n_i-1}^*, \quad (3.21)$$

В результате итерационного расчета конвективно-диффузионного переноса находится распределение газовых примесей в вентиляционной сети рудника на всем исследуемом интервале времени.

Следует сделать несколько важных замечаний касательно шага 2. Из (3.20) следует, что коэффициент продольной дисперсии для каждой ветви  $i$  должен быть не более величины  $D_i^{max}$ , исходя из условия сходимости явной по времени конечно-разностной схемы диффузионного типа [50, 111]:

$$D_i \leq D_i^{\max} = \frac{1}{2} \frac{\Delta L_i^2}{\Delta t}. \quad (3.22)$$

В противном случае диффузионный перенос массы в численной схеме будет искусственно ограничиваться в соответствии с условием  $s_i \leq 1/2$ . Для преодоления этого ограничения расчет диффузионного переноса может иметь несколько подытераций, количество которых будет определяться целочисленной величиной:

$$r_i = \left[ 2D_i \frac{\Delta t}{\Delta L_i^2} \right] = \left[ \frac{2D_i \Delta t}{v_i^2} \right]. \quad (3.23)$$

Операция  $[x]$  представляет собой округление величины  $x$  вверх до ближайшего целого. На каждой такой подытерации в (3.19) и (3.21) вместо  $s_i$  будет фигурировать  $s_i/r_i$ . Если количество подытераций  $r_i$  слишком велико ( $\geq 10$ ), то в рассматриваемой ветви процесс диффузии выражен намного сильнее процесса конвекции. Это встречается в горных выработках с низкой скоростью воздушного потока  $V_i$ . В этой ситуации конвекцией можно пренебречь, а величину  $\Delta L_i$  рассчитывать из условия Куранта по диффузии (3.22):

$$\Delta L_i = \sqrt{2D_i \Delta t}. \quad (3.24)$$

С учетом (3.12) и (3.13) коэффициент продольной дисперсии будет выше своего максимально допустимого значения, если выполнено условие:

$$V_{\text{ср}} < 36.8 \frac{s\sqrt{\alpha}}{P\Delta t}. \quad (3.25)$$

В (3.25) принято, что плотность воздуха  $1.2 \text{ кг/м}^3$ , т. е. шаг по времени всегда можно выбрать достаточно малым для того, чтобы условие (3.22) выполнялось.

Еще одним важным моментом является то, что коэффициент продольной дисперсии должен определяться не только скоростью воздушного потока в рассматриваемой ветви  $i$ , но и скоростью потока в соседних с ней ветвях. Физически это связано, например, с наличием застойных вихревых зон в местах сопряжения горных выработок [35]. Если к сквозной выработке с относительно высокой скоростью воздушного потока примыкает другая выработка с относительно малой скоростью потока, то на некоторой области последней будет происходить вихревое движение воздушных потоков, приводящее к дополнительному турбулентному перемешиванию вредных примесей. Только с учетом этого фактора в рамках описываемого метода возможно смоделировать изменение распределения газовой примеси в тупиковых горных выработках, имеющих в рамках одномерного подхода к описанию процессов вентиляции рудника нулевой расход воздуха.

Для обоснования идеи зависимости эффективного значения коэффициента продольной дисперсии вредной примеси от координаты вдоль оси горной выработки с относительно низким или нулевым расходом воздуха в пакете ANSYS Fluent была проведена серия численных расчетов стационарного движения воздуха в сквозной горной выработке и примыкающей к ней тупиковой горной выработке (Рисунок 3.2).

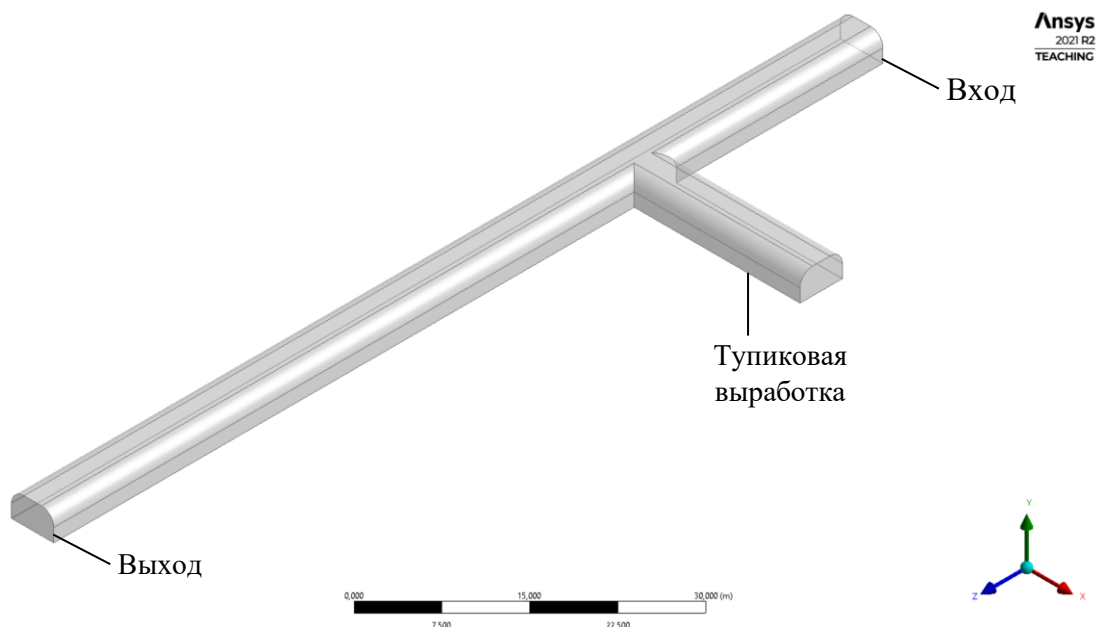


Рисунок 3.2 — Геометрия расположения горных выработок и расчетная область решения задачи

На входе в расчетную область задавалась средняя скорость воздушного потока  $V_0$ , длина тупиковой выработки принималась равной  $L$ . Сечение обеих выработок взято исходя из справочных данных по типовым сечениям горных выработок калийный рудников ВКМКС, пройденных комбайном Урал 20Р и равно  $15,5 \text{ м}^2$ .

Результаты численного моделирования трехмерного турбулентного течения воздуха показали, что формирующееся в тупиковой выработке вихревое движение имеет различную интенсивность на разных удалениях от устья выработки. Это подтверждает полученные ранее для модельных плоских задач решения [29].

Такое проветривание в Правилах безопасности [66] упоминают как «диффузионное». Целесообразно применить более точное название «диффузионно-вихревое» проветривание, а именно проветривание, реализуемое совокупностью воздушных потоков, формирующихся в тупиковой выработке в результате взаимодействия с турбулентной струей воздуха, двигающегося по сквозной выработке (Рисунок 3.3).

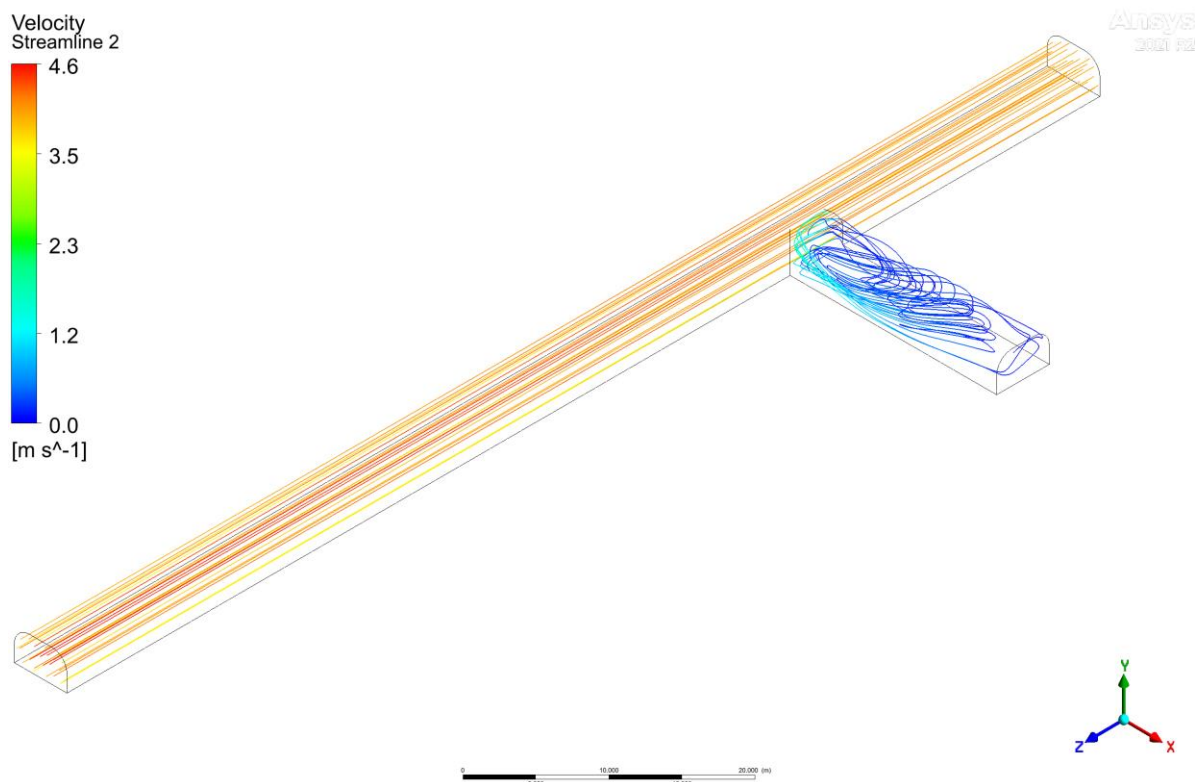


Рисунок 3.3 — Распределение линий тока в расчетной области, случай L=20 м

В системах проветривания рудников такое проветривание играет большую роль и встречается очень часто, но до сих пор не описывалось в концепции решения сетевых вентиляционных задач массопереноса.

В рамках рассматриваемой трехмерной постановки задачи эти движения и вызванный ими массоперенос правильнее называть «конвективным/адвективным», однако при переходе от трехмерного описания к одномерной модели для сетевой одномерной постановки неоднородные по поперечному сечению выработки конвективные потоки воздуха могут быть учтены только в рамках эффективного значения коэффициента дисперсии, а использующиеся ранее понятия молекулярная диффузия, турбулентная (вихревая) диффузия и продольная дисперсия можно дополнить понятием продольная крупновихревая диффузия.

Интенсивность диффузионного проветривания в тупиковой выработке характеризуется средним модулем по поперечному сечению продольной компонентой скорости, так как средняя скорость в тупике равна нулю. Значение коэффициента дисперсии определяется по формуле Лайгны [90,110] для расчета эффективного коэффициента дисперсии:

$$D = \frac{\int_s V_r (c - \bar{c}) dS}{S \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}}, \quad (3.26)$$

где  $\bar{c}$  – средняя концентрация вредной примеси в поперечном сечении  $S$ , %;  $V_r = V(y, z) - \bar{V}$  – относительная скорость воздуха, равная разнице фактической скорости  $V(y, z)$  и средней по сечению скорости  $\bar{V}$  (в данном случае последняя равна нулю), м/с.

Для оценки зависимостей коэффициента эффективного диффузионного переноса предположим, что концентрация вредной примеси  $c = c(x, y, z)$  в тупиковой выработке меняется в поперечном сечении относительно слабо, так, что ее приближенно можно представить в виде линейной функции декартовых координат:

$$c = a_0(x) + a_1(x)y + a_2(x)z. \quad (3.27)$$

Здесь  $x$  – продольная координата, направленная вдоль оси выработки,  $y, z$  – поперечных координаты. Функции  $a_i(x)$  в общем случае имеют сложный нелинейный вид, который не является предметом нашего исследования.

Согласно [29], при естественном проветривании тупиковой горной выработки распределение скорости и скалярных характеристик потока в поперечном сечении можно считать асимметричным, т.е. при определенном выборе центра системы координат  $Oxuz$ , а также направлений ортов осей  $Oy$  и  $Oz$  поле концентраций будет приблизительно удовлетворять свойству  $c(z) - \bar{c} = \bar{c} - c(-z)$ , а также  $V(z) = -V(-z)$ .

Рассматриваемый случай проветривания тупиковой выработки не в полной мере можно назвать естественным, поскольку помимо сил плавучести, вызванных вариацией поля плотности газозадушной смеси, на массообмен влияет воздушная струя, двигающаяся в сквозной выработке. Тем не менее, можно предположить, что при диффузионном проветривании тупиковой выработки в последней образуется схожая вихревая структура (с точностью до определенного поворота вокруг оси выработки). С учетом этого свойства, а также с учетом дополнительного предположения о малости  $a_1, a_2$  относительно  $a_0$ , выражение (3.26) упрощается:

$$D \approx a_0(x) \frac{\int_S |V| dS}{S a_0'(x)} \sim \int_S |V| dS. \quad (3.28)$$

То есть эффективный коэффициент продольной дисперсии вредной примеси в данном случае действительно определяется средней по поперечному сечению величиной модуля продольной компонентой скорости. Однако этот вывод будет справедлив только для тупиковой выработки, в которой интеграл продольной компоненты вектора скорости по поперечному сечению будет равен нулю. В противном случае под интегралом нужно учитывать скорость  $V_r$ .

Выражение (3.28) получено для фиксированного поля концентрации вредной примеси. Поскольку коэффициент продольной дисперсии не должен зависеть от

концентрации вредной примеси, предполагается, что данный вывод в будет справедлив и для других распределений вредных примесей в тупиковой выработке.

На рисунке 3.4 показана рассчитанная численно зависимость среднего по сечению модуля продольной компоненты скорости воздуха в тупиковой выработке  $\langle |V_x| \rangle$  от расстояния до ее устья (синяя кривая). Рассмотрен случай  $V_0 = 4$  м/с,  $L = 20$  м. На рисунке 3.5 показана та же зависимость, но в логарифмических координатах.

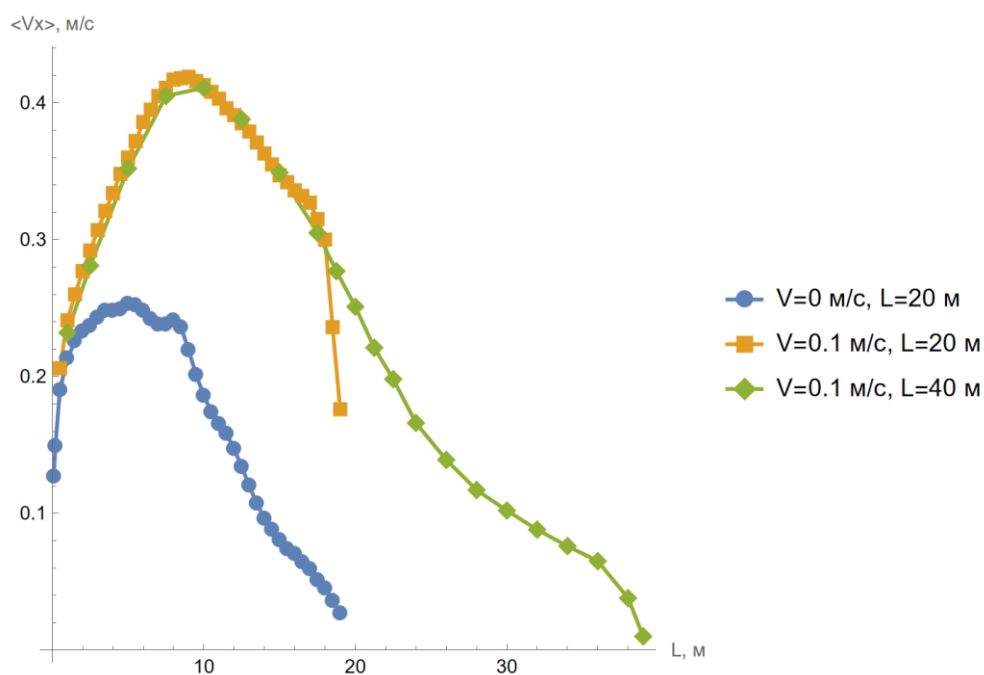


Рисунок 3.4 — Зависимость среднего по сечению модуля продольной компоненты скорости воздуха от продольной координаты, случай тупиковой выработки (синяя кривая) и вентиляционной сбойки с ненулевой средней скоростью (желтая кривая и зеленая кривая)



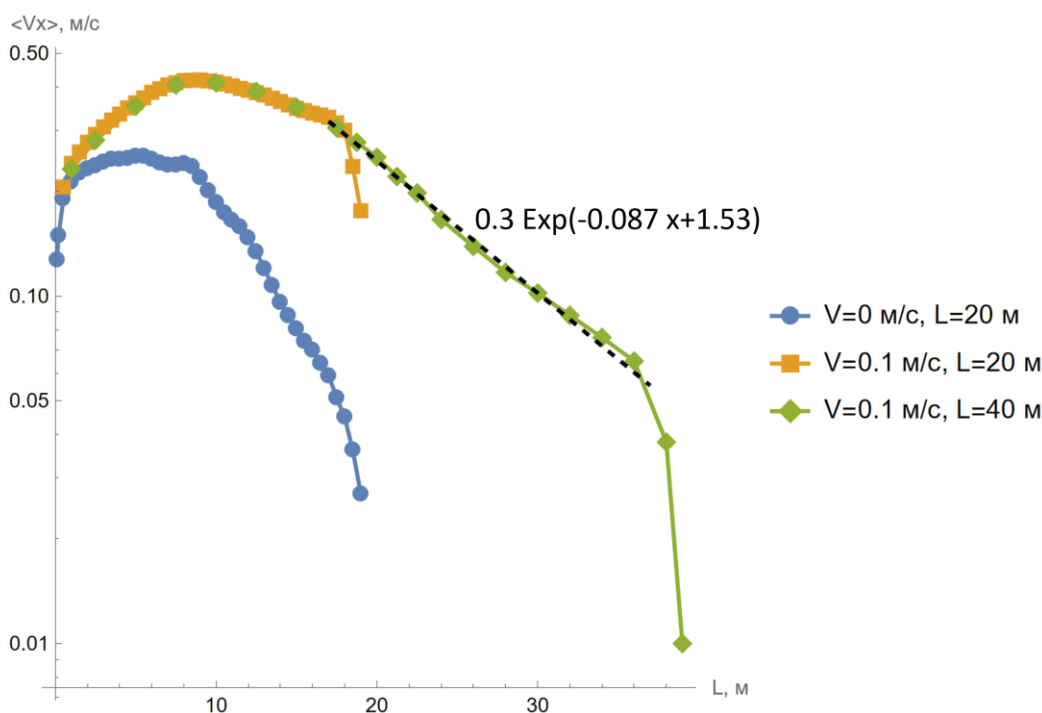


Рисунок 3.5 — Зависимость среднего по сечению модуля продольной компоненты скорости воздуха от продольной координаты, случай тупиковой выработки (синяя кривая) и вентиляционной сбойки с ненулевой средней скоростью (желтая кривая и зеленая кривая)

На начальном промежутке средняя продольная скорость резко возрастает до значения около 0,25 м/с и сохраняет его примерно до значения координаты 8 м. Далее следует участок уменьшения величины средней продольной скорости. Характер снижения величины  $\langle |V_x| \rangle$  приближенно можно принять линейным. Следует ожидать, что эффективный коэффициент продольной дисперсии будет меняться в данной выработке примерно по тому же закону. При определении  $D(x)$  важно принять во внимание и то, что в (3.28) при интеграле стоит множитель  $a_0/a'_0$ , являющийся в общем случае функцией от  $x$ . Этот множитель зависит от распределения средней по сечению концентрации вредной примеси вдоль тупиковой горной выработки. Последнее определяется предысторией проветривания этой выработки и может быть различным.

Иная ситуация будет наблюдаться если перейти от случая тупиковой выработки к случаю вентиляционной сбойки с относительно низкой средней скоростью в поперечном сечении. Если принять, что рассмотренная ранее тупиковая выработка теперь не является тупиковой, а на груди забоя есть сток со средней по сечению скоростью воздуха 0,1 м/с, то зависимость величины  $\langle |V_x| \rangle$  от продольной координаты несколько изменится. В данном случае при построении желтой кривой на рисунках 3.4 и 3.5 выводится уже интеграл относительной скорости воздуха в поперечном сечении (за вычетом средней величины 0.1 м/с).

На начальном отрезке (до 8 м) будет происходить примерно линейный рост величины  $\langle |V_x| \rangle$  (развитие вихря застойной зоны), далее будет происходить примерно линейное падение величины  $\langle |V_x| \rangle$ . После 18 м скорость падения резко увеличится, однако в данном случае это связано с влиянием граничного условия, так что отрезок (18 м; 20 м) не следует принимать во внимание при анализе.

При увеличении длины вентиляционной сбойки (см. зеленую кривую) до 40 м скорость уменьшения величины  $\langle |V_x| \rangle$  постепенно снижается, а линейная зависимость превращается в нелинейную. При еще большем увеличении длины вентиляционной сбойки величина  $\langle |V_x| \rangle$  стремится к асимптоте, равной нулю, по закону, близкому к экспоненциальному.

Таким образом, можно заключить, что коэффициент продольной дисперсии в горных выработках около их сопряжения с другими горными выработками с относительно высокой средней скоростью воздушного потока, существенно зависит от характера массопереноса в вихре, циркулирующем в застойной зоне, а его зависимость от продольной координаты выработки имеет сложный немонотонный характер.

Подробный количественный учет всех особенностей нелинейной зависимости  $\langle |V_x| \rangle(L)$  не имеет особого практического смысла, а потому на практике при проведении численных расчетов переноса вредных примесей в системах горных выработок в одномерной постановке достаточно задаться некоторыми кусочно-линейной или экспоненциальной функциями  $D(L)$ , которые будут учитывать размер застойной зоны вихревого течения (где коэффициент продольной дисперсии имеет повышенное значение) и максимальную продольную скорость в среднем. Размер зон интенсивных вихревых течений может быть определен с использованием зависимости из [62] в виде:

$$\min(L_{\text{своб}}, 0.0376b Re^{0.4}), \quad (3.29)$$

где  $b$  - ширина выработки, м;  $Re$  – число Рейнольдса воздушного потока в сквозной выработке;  $L_{\text{своб}}$  – длина свободной части выработки, м. Для тупиковых выработок  $L_{\text{своб}}$  равен обычной длине, для вентиляционных сбоек он равен расстоянию от устья сбойки до вентиляционной перемычки (или окна).

Предложенный подход дает возможность (в модели) резко интенсифицировать «вынос» примеси из выработки за счет высоких значений коэффициента продольной диффузии. Тем самым обеспечивается совершенствование модели конвективно-диффузионного переноса вредных примесей в вентиляционных сетях. Для реализации такого подхода можно принять и использовать в (3.20) пересчитанный коэффициент продольной дисперсии:

$$D_{i,j}^* = D_i + \Delta D_i^{in} \exp(-ad_{in}) + \Delta D_i^{out} \exp(-ad_{out}), \quad (3.30)$$

$$\Delta D_i^{in} = (D_{adj}^{in} - D_i)^+, \quad \Delta D_i^{out} = (D_{adj}^{out} - D_i)^+, \quad (3.31)$$

$$d_{in} = x_j, \quad d_{out} = L_i - x_j. \quad (3.32)$$

Здесь  $\Delta D_i^{in}$  — разница между продольной дисперсией  $D_i$  в рассматриваемой ветви и дисперсией  $D_{adj}^{in}$  в смежной с ней (по начальному узлу),  $m^2/c$ ;  $\Delta D_i^{out}$  — разница между продольной дисперсией  $D_i$  в рассматриваемой ветви и дисперсией  $D_{adj}^{out}$  в смежной с ней (по конечному узлу),  $m^2/c$ ;  $a$  — модельный параметр,  $m^{-1}$ ;  $d_{in}$  — расстояние от рассматриваемого узла до начала ветви,  $m$ ;  $d_{out}$  — расстояние от рассматриваемого узла до конца ветви,  $m$ ;  $x^+ = \max(0; x)$  — обобщенная функция.

В случае использования коррекции дисперсии (3.29)–(3.31) надо учитывать, что условие (3.22) теперь должно применяться для максимального значения переменного по длине коэффициента продольной дисперсии. Поскольку дисперсия (3.14) пропорциональна скорости воздушного потока, подход (3.29)–(3.31) физически можно трактовать как корректировку коэффициента продольной дисперсии по фактору влияния более высоких скоростей воздушного потока в соседних ветвях на массообменные процессы в рассматриваемой ветви. В данном случае процесс вихревого перемешивания воздуха в застойной зоне ветви с более низкой скоростью физически больше представляет собой турбулентную диффузию, а не дисперсию. Тем не менее в рамках данного подхода будем называть величину  $D_{i,j}^*$  эффективным коэффициентом продольной дисперсии.

Эмпирический параметр  $a$  определяется экспериментально или в ходе численного трехмерного моделирования для конкретных видов сопряжений горных выработок. Качественную оценку для данного параметра можно сделать, например, на основании [69], где предложена формула для уменьшения интенсивности воздухообмена в призабойной части тупиковой горной выработки по мере удаления от конца вентиляционного трубопровода:  $a = 0.47/h$  ( $h$  — ширина выработки).

### 3.3. Исследование диффузионных процессов переноса газов по длине горных выработок

Конечно-разностная схема была предварительно реализована и исследована в пакете компьютерной алгебры Wolfram Mathematica 10. Первоначально рассмотрена задача о проветривании участка вентиляционной сети, состоящего из воздухоподающего и вентиляционного штреков, а также вентиляционной сбойки с перемычкой и относительно низким расходом воздуха. Длины ветвей и расходы в них указаны на рисунке 3.6. Эффективные диаметры всех ветвей приняты равными 3.9 м, плотности воздуха

$1.2 \text{ кг/м}^3$ , а коэффициенты аэродинамического сопротивления  $0.0044 \text{ кг/м}^3$ . Сопротивление перемычки подобрано таким образом, чтобы обеспечить требуемое соотношение расходов в параллельных ветвях 2 и 3.

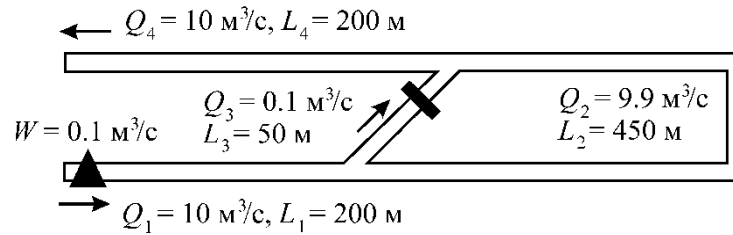


Рисунок 3.6 — Геометрия участка вентиляционной сети и параметры задачи

В начальный момент времени в начале ветви 1 начинает действовать источник выделения вредной примеси (обозначен треугольником), после чего спустя промежуток времени  $t = 10$  мин выделение прекращается. Далее проводится наблюдение за временной динамикой выноса вредной примеси из исследуемой системы горных выработок.

Рассмотрено три варианта:

- модель “идеального вытеснения” без учета диффузии [30];
- постоянный по длине ветви эффективный коэффициент продольной дисперсии (3.11);
- переменный по длине ветви эффективный коэффициент продольной дисперсии в соответствии с подходом (3.29)–(3.31).

С учетом принятых физических параметров задачи эффективные коэффициенты продольной дисперсии для ветвей 1–4 равны 1, 0.99, 0.01 и  $1 \text{ м}^2/\text{с}$  соответственно. Эти значения использовались при расчетах по второму варианту. На рисунке 3.7 приведена зависимость переменного коэффициента продольной дисперсии в ветви 2, рассчитанного по формулам (3.29)–(3.31) с учетом принятых параметров задачи ( $h = 3.45 \text{ м}$ ). Данная зависимость использовалась для расчетов по третьему варианту. Шаг по времени равен 80 с, а количество шагов по пространству для ветви 2 равно 75.

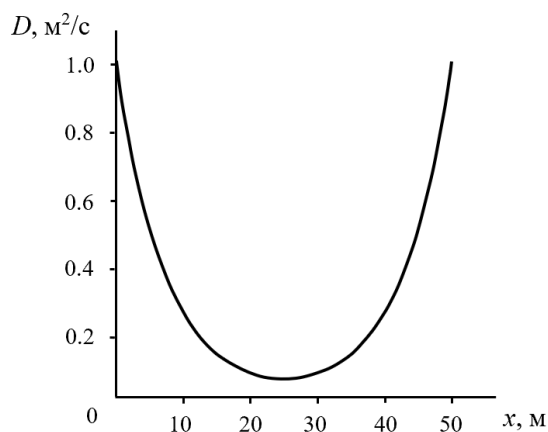


Рисунок 3.7 — Переменный коэффициент продольной дисперсии в ветви 2 как функция продольной координаты  $x$

Ниже на рисунке 3.8 показаны результаты численного моделирования — распределение концентрации вредных примесей в ветви 2 в различные моменты времени после начала выделения вредной примеси. По оси  $y$  отмечена безразмерная концентрация  $C' = CQ/W$ . Общее время расчета 2 ч. Представлены три момента времени — 30 мин, 1 ч и 1 ч 52 мин после начала действия источника выделения вредности. Последний момент времени выбран чуть меньшим, чем время проветривания сбойки в рамках модели «идеального вытеснения».

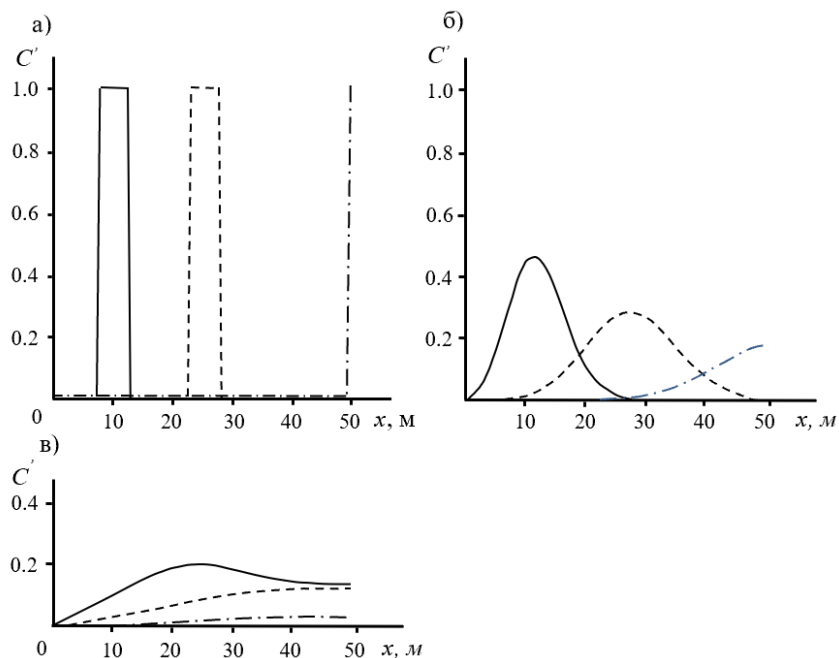


Рисунок 3.8 — Распределения безразмерной концентрации вредных примесей в ветви 2 в различные моменты времени:  $a$  — модель “идеального вытеснения”;  $б$  — постоянный коэффициент продольной дисперсии;  $в$  — переменный коэффициент продольной дисперсии

Согласно рисунку 3.8, введение диффузионного слагаемого с постоянным коэффициентом продольной дисперсии (своим для каждой ветви) дает существенное изменение продольных профилей безразмерной концентрации, а также уменьшение максимальной концентрации вредной примеси в ветви 2 к конечному моменту времени (1 ч 52 мин) в 5 раз. Введение неравномерного коэффициента продольной дисперсии в соответствии с моделью (3.29)–(3.31) способствует еще большему уменьшению максимальной концентрации вредной примеси в ветви 2 к конечному моменту времени — в 6 раз по сравнению с вариантом постоянной продольной дисперсии. В целом полученные результаты свидетельствуют о чувствительности решения к способу задания коэффициента продольной диффузии. По этой причине физически обоснованное задание распределения коэффициента продольной дисперсии на сопряжениях горных выработок является важным, что указывает на необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на определение параметров, входящих в формулу (3.14) и модель (3.29)–(3.31), по данным экспериментальных измерений в условиях реальных горных выработок рудников или лабораторных стендов.

Важно отметить, что с точки зрения численной процедуры введение неравномерного коэффициента продольной дисперсии оказывается неблагоприятным, так как может приводить к существенному увеличению общего расчетного времени. Рост времени связан со значительным увеличением количества подытераций  $r$ . Если для случая постоянной продольной дисперсии в рассматриваемом случае для ветви 2  $r = 4$ , то для переменной продольной дисперсии  $r$  в отдельных узлах достигает 352. Приемлемое решение данной проблемы для рудничных вентиляционных сетей, состоящих из большого количества ветвей с относительно низким расходом воздуха, заключается в расчете шага по пространству исходя из условия Куранта по диффузии (3.24). С учетом этого решения для рассмотренного случая количество пространственных шагов ветви 2 снижается с 75 до 12, а величина  $r$  становится равной 1.

Описанный алгоритм реализован в АК «АэроСеть» с целью выполнения расчета распространения газовых примесей на моделях вентиляционной сети рудников произвольной топологии. Результаты моделирования распространения газовых примесей без учета и с учетом продольной дисперсии приведены на рисунках 3.9 и 3.10 соответственно.

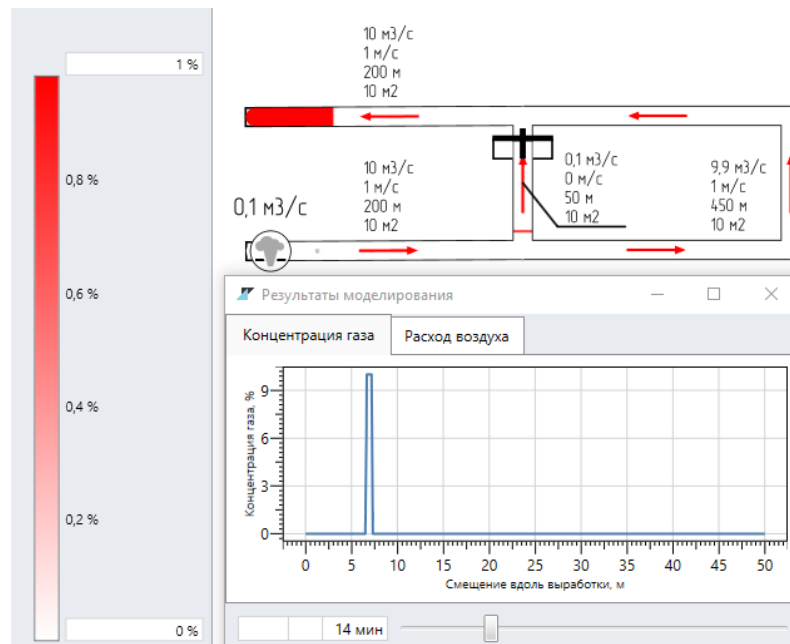


Рисунок 3.9 — Результат моделирования распространения газовых примесей в АК «АэроСеть» без учета продольной диффузии

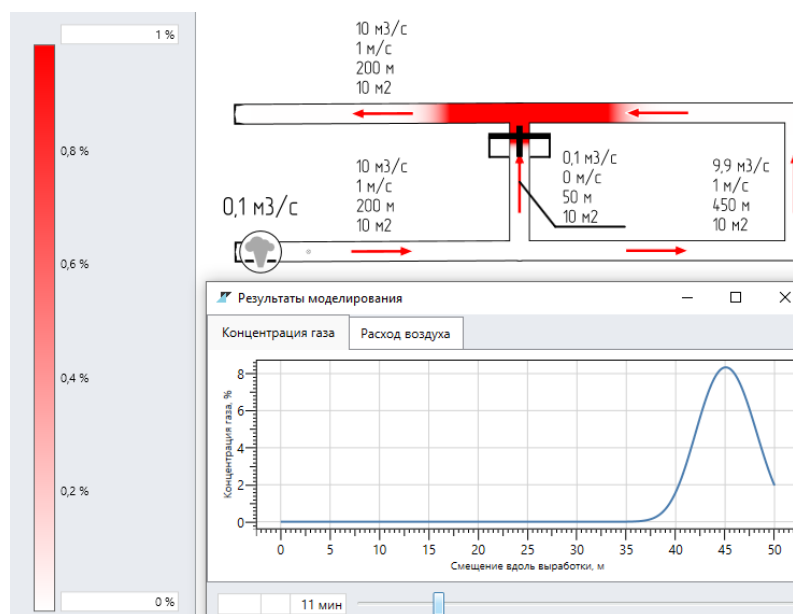


Рисунок 3.10 — Результат моделирования распространения газовых примесей в АК «АэроСеть» с учетом продольной диффузии

Результаты тестового расчета показали, что при условии учета диффузии газовые примеси удаляются из рассматриваемой выработки через 11 минут после начала расчета, тогда как без учета диффузии на 14 минуте наблюдается пиковая концентрация газа.

Аналогичная ситуация наблюдается при расчете газораспределения в вентиляционных сетях реальных рудников. Рассмотрим процесс распространения газовых примесей на модели вентиляционной сети подсечного горизонта рудника «Комсомольский», приведенной на рисунках 3.11 и 3.12.



Рисунок 3.11 — Результат моделирования распространения газовых примесей в АК «АэроСеть» без учета продольной диффузии



Рисунок 3.12 — Результат моделирования распространения газовых примесей в АК «АэроСеть» с учетом продольной диффузии



Результат моделирования газораспределения в модели вентиляционной сети рудника Комсомольский показал, что при расчете распространения газовых примесей без учета продольной диффузии наблюдаются пиковые концентрации газа выше 2% по объему, а при учете продольной диффузии наблюдается размывание газового облака по длине выработок и остаточные концентрации газа не превышают 0,5 процентов по объему. Таким образом учет продольной диффузии позволяет выполнить расчет распространения газовых примесей, корректность результатов расчета подтверждается данными натурных исследований на добычных участках действующих рудников.

Кроме того, разработанная модель позволяет выполнить исследование относительно влияния конфигурации горных выработок на диффузионное разбавление газовых примесей в исходящих вентиляционных струях. Следует рассмотреть фиксированный расход воздуха на исходящей струе при различных конфигурациях горных выработок, по которым этот воздух идет. При этом к конфигурации горных выработок относятся их геометрические параметры и количество.

Для решения задачи рассмотрено несколько вариантов параметров горных выработок. Длина выработок исходящей струи принята 4000 метров, общий расход воздуха  $100 \text{ м}^3/\text{с}$ . Рассматриваются следующие варианты конфигураций выработок исходящей струи:

- по двум параллельным горным выработкам сечением  $15 \text{ м}^2$ ;
- по одной горной выработке сечением  $15 \text{ м}^2$ ;
- по одной горной выработке увеличенным сечением  $30 \text{ м}^2$ .

Для задания начальной концентрации газов в исходящей струе предусматривается точечный источник газовой выделения, который действует в течение 1 минуты с мощностью  $10 \text{ м}^3/\text{мин}$  (интенсивное краткосрочное газовыделение из массива при работе комбайна или эквивалентное газовыделение от машин с ДВС на участке). Принципиальные расчетные схемы, конфигурация и параметры выработок, а также результаты расчета без учета и с учетом продольной диффузии приведены на рисунках 3.13 и 3.14 соответственно.

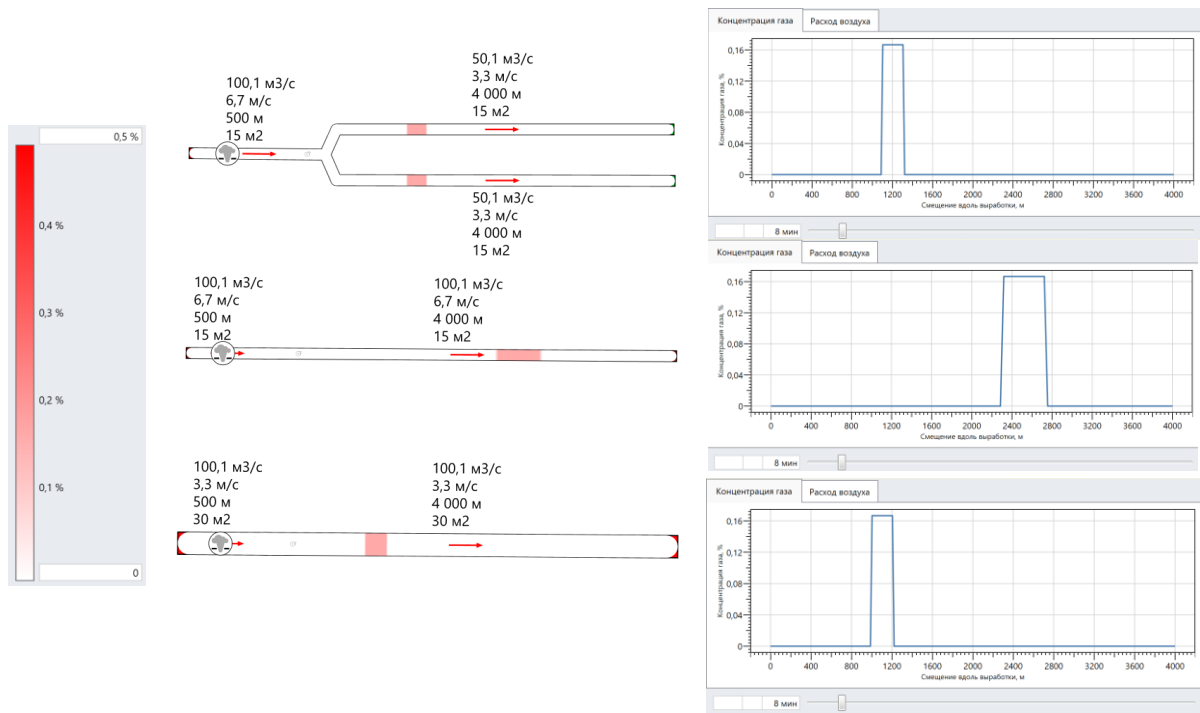


Рисунок 3.13 — Результат расчета распространения газа без учета продольной диффузии

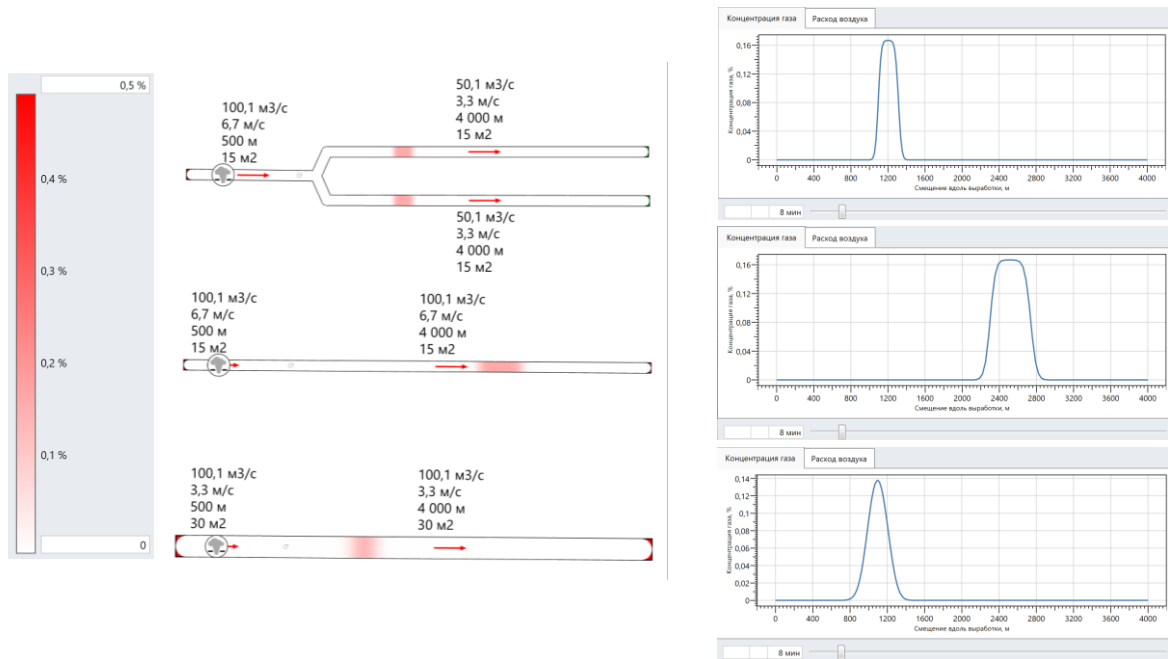


Рисунок 3.14 — Конфигурация и параметры выработок на исходящей струе

Результаты расчета распространения газа по выработкам различных конфигураций с учетом диффузии сведены в таблицу 3.1. Концентрация газа в выработке без учета диффузии равна начальной.

Таблица 3.1 — Результаты расчета распространения газа при различных геометрических параметрах выработок на исходящей струе

Вариант подачи воздуха	Начальная концентрация	Конечная концентрация
Две параллельные выработки	0,1666	0,1623
Одна выработка	0,1666	0,1665
Одна выработка увеличенного сечения	0,1594	0,1019

По представленным результатам можно сделать вывод, что в выработках исходящей струи происходит размывание газового облака и концентрация газа снижается по длине выработки. Это является одной из причин того, что на большинстве рудников на исходящей струе фиксируются малые концентрации газов или не фиксируются вовсе и говорит о необходимости учета продольной диффузии не только в выработках с малыми скоростями движения воздуха.

### 3.4. Выводы

В результате проведенных исследований, направленных на разработку конвективно-диффузионной модели переноса газовых примесей, можно сделать следующие выводы:

- Предложено на входных/выходных участках горных выработок типа сбоек с перемычками с низкими скоростями движения и вихревым перемешиванием воздуха в застойных зонах около сопряжений горных выработок учитывать вихревую продольную диффузию, интенсивность которой может быть сопоставима с продольной дисперсией;
- предложено на прямых участках протяженных сквозных интенсивно проветриваемых горных выработок учитывать продольную дисперсию из-за неоднородности поля скоростей, а молекулярной и турбулентной диффузией можно пренебречь.
- получена формула для расчета величины коэффициента продольной диффузии;
- предложен метод расчета переменного по длине выработки эффективного коэффициента продольной дисперсии исходя из соотношения скоростей воздушных потоков в рассматриваемой горной выработке и в смежных с ней.
- разработан численный алгоритм расчета нестационарной задачи распределения вредных примесей в сети горных выработок, основанный на методе расщепления по физическим процессам и выполнена реализация разработанного алгоритма в модуле теплогазодинамического расчета аналитического комплекса «АэроСеть».

#### **4. РАЗРАБОТКА СХЕМ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ**

Системы вентиляции рудников значительно отличаются, что в первую очередь определяется горнотехническими особенностями, такими как способ ведения горных работ, схемой вскрытия, подготовки, системами разработки и т.д. Возможность и эффективность работы рециркуляционных систем зависит от места их размещения, а безопасность применения рециркуляционных систем в значительной степени зависит от количества повторно используемого воздуха.

Поэтому разработка схем рециркуляционного проветривания подземных рудников включает в себя теоретическое исследование газовой обстановки при наличии рециркуляции, определение оптимальных параметров работы рециркуляционных установок, исследование аэродинамических параметров вентиляционной сети, разработку рециркуляционных схем вентиляции с учетом эффективности и безопасности их работы. Исследования, посвященные этим вопросам, приведены в данной главе.

##### **4.1. Методология организации схем рециркуляционного проветривания подземных рудников**

С технической точки зрения возврат части исходящего воздуха для организации контролируемого рециркуляционного проветривания кажется элементарным и для понимания, и для исполнения, но организация рециркуляционного проветривания в аэродинамически связанной системе подземных горных выработок является сложной задачей, особенно с позиции обеспечения безопасности ведения горных работ и безопасности труда горнорабочих и может быть недопустимым по ряду причин. Во-первых, распределение воздушных потоков зависит не только от мощности и местонахождения используемого активного источника тяги, применяемого для организации рециркуляции, но и от топологических особенностей сети горных выработок. Во-вторых, принципы организации рециркуляционного возврата исходящей струи противоречат традиционной и действующей ныне парадигме классической однонаправленной вентиляции, для которой рециркуляция запрещена.

Принцип однонаправленности движения и однократности использования воздуха в горных выработках заключается в том, что свежий воздух подается в рабочую зону, где заменяет исходящий воздух, а поддержание минимальной скорости воздушной струи не менее 0,15 м/с обеспечивает четкую фиксацию направления движения кожей лица человека и тем самым способствует его пространственной ориентации в системе

проветривания. В современных условиях нужна другая парадигма организации проветривания, другие стандартные приемы (схемы) управления вентиляционными потоками, позволяющие увязать традиционное безрециркуляционное использование воздушных масс классического проветривания с многократным повторным использованием воздушных масс при контролируемом рециркуляционном проветривании. При этом в понятие контроль сливаются и мониторинг качества воздуха в той или иной точке, и техническое управление воздушными потоками. Последнее наиболее просто и надежно обеспечить стандартизацией нужных конфигураций воздухораспределения в сети горных выработок. Такие стандартные конфигурации должны быть научно обоснованы, а при внедрении конкретной организации рециркуляционного проветривания она должны быть просчитана и обязательно закреплена проектом, в котором отражается цифровизация процессов рециркуляционного проветривания, обоснование его конкретной организации в конкретной ситуации компьютерным расчетом распределения воздушных потоков, газовой, тепловой и пылевой обстановок.

Рассмотрим структуру вентиляционных потоков на примере рисунка 4.1, на котором приведены три принципиальные схемы конфигураций горных выработок, порождающие различные условия возможного использования рециркуляционного проветривания. Две основные классические, связанные с идеальным последовательным проветриванием рабочих зон, свойственным рудным шахтам до начала XX века (рисунок 4.1а) и идеального автономного (независимого, параллельного) проветривания рабочих зон, свойственного угольным шахтам, доминирующего везде с середины XX века (рисунок 4.1б), дополненные простейшей схемой, отражающей многосвязность систем подземных горных выработок, современных рудных шахт (рисунок 4.1в).

На этих схемах линии/стрелки обозначают вентиляционные потоки в агрегированной совокупности горных выработок, рассматриваемых как аэродинамические каналы, формирующие совместно со средствами регулирования (активными и пассивными) структуру потоков, а точки – места слияния/деления потоков в сопряжениях горных выработок. Такая схема одновременно отображает и конфигурацию потоков, и конфигурацию сети горных выработок.

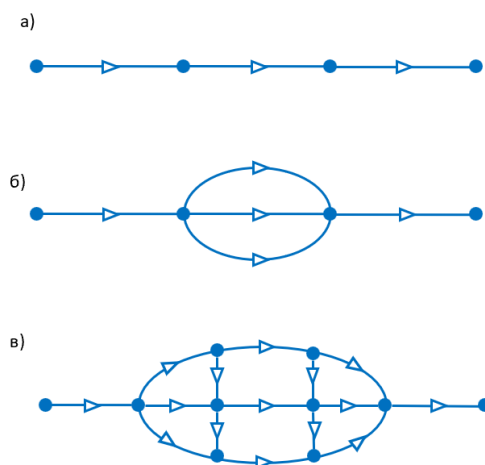


Рисунок 4.1 — Основные типы конфигураций горных выработок: последовательная (а), параллельная (б), многосвязная (в)

Организация возврата части исходящей струи в свежую струю при схеме последовательного проветривания всех рабочих зон, приведенной на рисунке 4.1а никогда не предполагалась, а её реализация технически достаточно сложна, что связано с созданием, как минимум, еще одного аэродинамического канала для возврата струи, т.е. проходки новых выработок, как правило, не вносящих вклад в добычу полезного ископаемого.

Организация возврата части исходящей струи в свежую струю при схеме проветривания рабочих зон, приведенной на рисунке 4.1б, на которой основана вся современная рудничная вентиляция, и которая жестко закреплена действующими правилами безопасности, технически относительно проста, но юридически фактически запрещена, кроме отдельных конкретных случаев, получивших специальное обоснование безопасности (т.е. обоснованное отступление от правил). Три стрелки на рисунке 4.1б отображают вентиляционные потоки (и соответствующие им три группы выработок) автономного проветривания рабочих зон. Первая – потоки, связанные с проветриванием рабочих зон, обеспеченных свежим воздухом по действующим нормам и правилам. Вторая – утечки свежего воздуха. Третья – потоки, связанные с проветриванием рабочих зон, не обеспеченных свежим воздухом по действующим нормам и правилам, для которых возможным и целесообразным является использование рециркуляционного проветривания.

Рециркуляция, захватывающая забой, блок, панель, горизонт, рудник в целом, различна по степени влияния и характеру проявления процессов движения воздуха, а потому необходимо рассматривать конкретную организацию рециркуляционного проветривания. С этой точки зрения очень интересна организация рециркуляционного проветривания рудника в целом, поскольку позволяет все утечки воздуха и весь воздух запасов в расчете отправить на главную цель – нормализацию проветривания, требуемую

условиями ведения горных работ. Вместе с тем, такая организация чревата невольным созданием байпаса для всего рудника и закорачивания струи свежего воздуха вопреки действия вентилятора-рециркулятора с воздухоподающего ствола на вентиляционный.

Рассмотрим два принципиально разных варианта работы рециркуляционного вентилятора относительно действия главной вентиляторной установки. Первый вариант показывает работу вентилятора-рециркулятора против действия общешахтной депрессии (рисунок 4.2а), а второй вариант отражает работу вентилятора-рециркулятора сонаправленно с действием общешахтной депрессии для случаев без возникновения опрокидывания струи и при условии появления возвратных потоков (рисунок 4.2б и 4.2в соответственно). Во всех случаях расход воздуха, подаваемого в нуждающуюся в нем рабочую зону, вырастает, таким образом достигается главная цели рециркуляции, а именно улучшение проветривания рабочих зон. Вспомогательные цели, такие как сокращение или использование утечек и сверхнормативных запасов свежего воздуха, также достигаются. В этом содержится сущность регулирования распределения воздуха средствами рециркуляции.

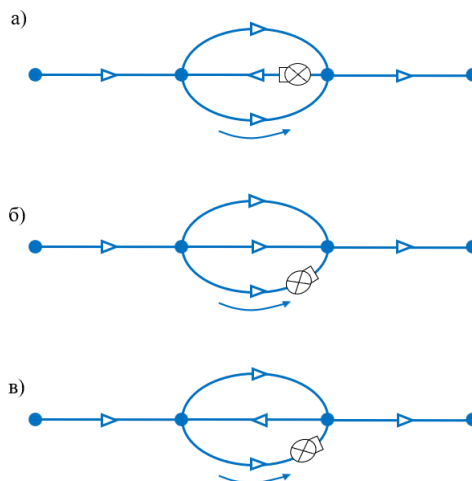


Рисунок 4.2 — Основные варианты размещения активного источника тяги в простейшей схеме автономного проветривания горных выработок (действие вентилятора направлено: против действия ГВУ (а), сонаправленно с действием ГВУ (б) и (в))

Организация возврата части исходящей струи в свежую струю по схеме 4.2а несколько не отменяет и даже расширяет возможности, а также в чем-то оказывается намного сложнее схем 4.2б и 4.2в, поскольку может быть осуществлена самыми различными способами в условиях наличия множества рабочих зон, что неизбежно порождает дополнительные сложности сбалансированной подачи требуемого для проветривания свежего воздуха во все рабочие зоны. Именно эта ситуация требует стандартизированных решений и упорядочения факторов, принимаемых во внимание при организации

эффективного рециркуляционного проветривания современных многосвязных систем горных выработок. Классикой рудничной вентиляции являются возвратноточные и прямоточные схемы проветривания, рассмотрим организацию рециркуляционного проветривания для этих вариантов на схемах, приведенных на рисунке 4.3.

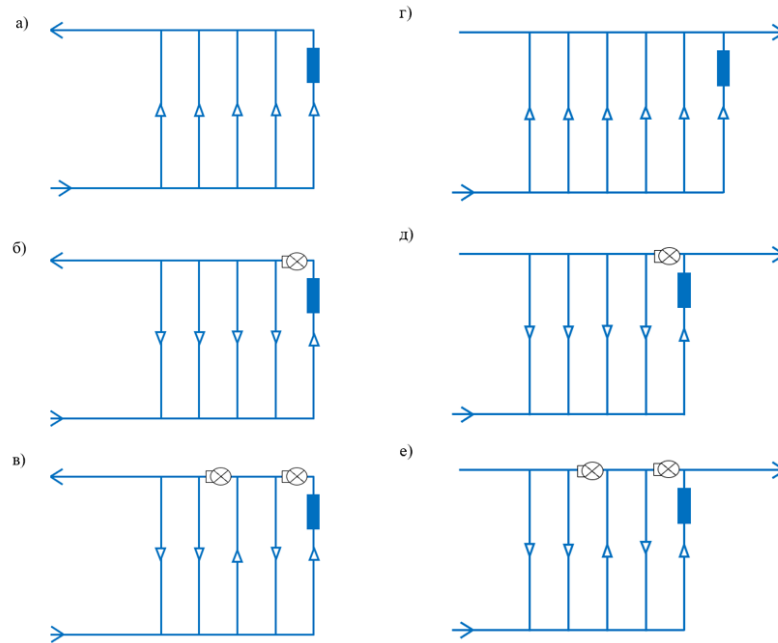


Рисунок 4.3 — Основные стандартные варианты организации размещения активного источника тяги при возвратноточной и прямоточной схемах проветривания соответственно: (а, г) – структура течений за счет общешахтной депрессии; (б, д) – организация рециркуляционного проветривания; (в, е) - организация рециркуляционного проветривания с расширенной рециркуляционной зоной с помощью дополнительного активного источника тяги

При возвратноточном проветривании разница депрессий нарастает от края проветриваемого участка (рудника в целом, фланга, панели, блока) к входу и выходу вентиляционной струи, что порождает множественные и трудноустраняемые утечки свежего воздуха (рисунок 4.3а). Поставив активный источник тяги (рисунок 4.3б), практически все утечки можно «опрокинуть», усилив за их счет проветривание рабочей зоны. Учитывая рост утечек с удалением от источника тяги, оптимальным является установка еще одного источника тяги, уменьшающего утечки и расширяющего зону рециркуляционных потоков (рисунок 4.3 в)). Аналогичные меры можно предпринять и при прямоточной схеме проветривания (рисунок 4.3г, 4.3д, 4.3е). Следует отметить, что работа источников тяги – рециркуляторов направлена в этом случае против действия общешахтной депрессии, что приводит (в целом) при том же напоре ГВУ к чуть меньшим расходам. Однако большое сопротивление стволов фактически нивелирует эту теоретическую разницу на практике и в этом случае рециркуляционное проветривание остается эффективным и



технически целесообразным. В общем случае для оценки эффективности рециркуляции нужно иметь количественные критерии оценки, дополняющие сделанные выше качественные, а при детальном расчете рециркуляционных систем следует проводить расчеты с использованием апробированных пакетов вычислительных средств, и адекватных математических моделей турбулентного теплопереноса [29]. Вместе с тем и сама идеология этих расчетов, и соответствующие её методы выходят за рамки требований парадигмы действующих Правил безопасности и требуют своего научно-обоснованного развития.

#### **4.2. Определение оптимальных параметров рециркуляционного проветривания в зависимости от аэродинамических характеристик вентиляционной сети**

В предыдущих разделах было показано, что применение рециркуляции позволяет задействовать те объемы воздуха, которые непосредственным образом не подаются на разжижение газовых примесей (утечки воздуха). При этом основная цель применения рециркуляционного проветривания заключается в возможности снижения подачи свежего воздуха за счет работы главных вентиляторных установок. Кроме того, было показано, что рециркуляционное проветривание тем эффективнее, чем больший объем утечек удастся вовлечь в рециркуляционный контур (чем выше коэффициент внутренних утечек участка). В таком случае может показаться, что наиболее целесообразным вариантом является организация рециркуляции максимального масштаба в пределах шахтного поля, но могут возникать условия, когда рециркуляционная установка оказывает значительное негативное влияние на работу ГВУ [15]. С другой стороны, основное снижение энергопотребления достигается за счет того, что не требуется подавать воздух через главные воздухоподающие выработки. Таким образом, включать в рециркуляционный контур главные воздухоподающие выработки, обладающие, как правило, большим аэродинамическим сопротивлением, не всегда является целесообразным. При этом следует иметь в виду, что внутри рециркуляционного контура общий расход воздуха возрастает и дополнительно появляются энергозатраты на работу рециркуляционной установки.

В связи с этим требуется проанализировать энергоэффективность рециркуляционного проветривания в зависимости от аэродинамических параметров рециркуляционного контура и параметров рециркуляции.

Для этого рассмотрим следующую модель проветривания с рециркуляционным контуром. Модель аналогична применяемой в главе 2, но рассматривается не распределение газа в системе, а суммарное энергопотребление вентиляторных установок. При

этом все сопротивления считаются фиксированными, в модели выделяется три вида аэродинамических сопротивлений – аэродинамическое сопротивление главных направлений, аэродинамическое сопротивление выемочного участка (является эквивалентом общего сопротивления двух параллельных ветвей – рабочей зоны и утечек), и аэродинамическое сопротивление рециркуляционной сбойки. Также в модели введен дополнительный параметр  $L$ , зависящий от места размещения рециркуляционной установки. Чем больше данный параметр, тем больше доля аэродинамического сопротивления главных направлений, входящих в рециркуляционный контур.

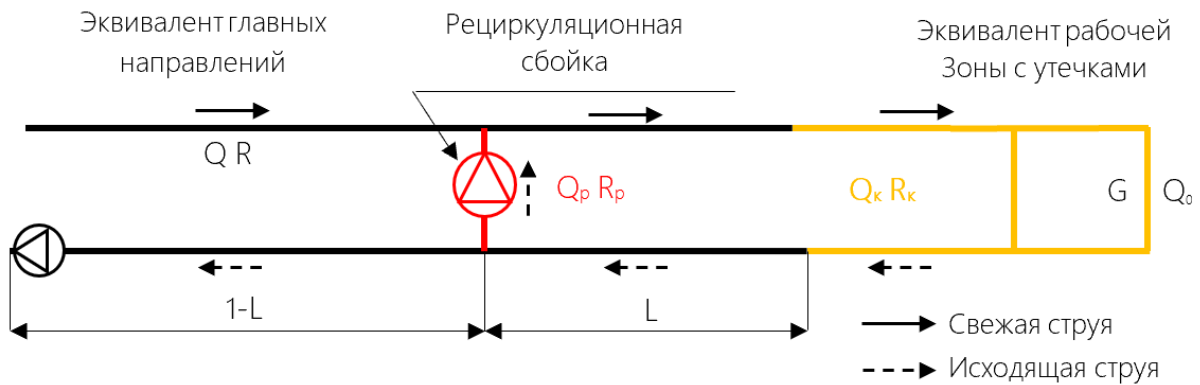


Рисунок 4.4 — Аэродинамическая модель рециркуляционного контура

В качестве основных параметров модели выбраны количество воздуха, подаваемого без учета рециркуляции и утечек  $Q_0$ , коэффициенты утечек и рециркуляции в системе.

В данной модели расходы воздуха с учетом выражения (2.3) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}})} Q_0, \\
 Q_k &= \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}}) \cdot (1 - K_{\text{рец}})} Q_0, \\
 Q_p &= \frac{K_{\text{рец}} \cdot (1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}}) \cdot (1 - K_{\text{рец}})} Q_0.
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Сопротивления отдельных ветвей в данной системе определяются как:

$$\begin{aligned}
 R &= (1 - L) \cdot R_0, \\
 R_k &= L \cdot R_0 + R_{p3}, \\
 R_p &= R_{сб}.
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

С использованием данных выражений установлено, что общее энергопотребление в контуре, которое будут затрачивать главная и рециркуляционная установки для поддержания заданного распределения расходов, можно оценить при помощи следующего выражения:

$$\begin{aligned}
N = (1 - L) \cdot R_0 \cdot \left( \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}})} Q_0 \right)^3 + (L \cdot R_0 + R_{\text{РЗ}}) \cdot \\
\cdot \left( \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}}) \cdot (1 - K_{\text{рец}})} Q_0 \right)^3 + R_{\text{сб}} \cdot \\
\cdot \left( \frac{K_{\text{рец}} \cdot (1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}}) \cdot (1 - K_{\text{рец}})} Q_0 \right)^3.
\end{aligned} \quad (2.30)$$

После некоторых преобразований полученный результат можно записать в виде:

$$N = \left( (1 - L) \cdot R_0 + \frac{(L \cdot R_0 + R_{\text{РЗ}})}{(1 - K_{\text{рец}})^3} + \frac{R_{\text{сб}} \cdot K_{\text{рец}}^3}{(1 - K_{\text{рец}})^3} \right) \cdot \left( \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}})} Q_0 \right)^3, \quad (2.31)$$

где  $L$  — доля сопротивления выработок главных направлений, входящая в рециркуляционный контур;  $Q_0$  — расход воздуха, поступающего на проветривание рабочей зоны, м<sup>3</sup>/с;  $K_{\text{ут}}$  — коэффициент утечек;  $K_{\text{рец}}$  — коэффициент рециркуляции;  $R_{\text{РЗ}}$  — аэродинамическое сопротивление рабочей зоны, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>;  $R_{\text{сб}}$  — аэродинамическое сопротивление рециркуляционной сбойки, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>;  $R_0$  — полное аэродинамическое сопротивление главных направлений, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>.

Можно заметить, что первая скобка описывает эффективное сопротивление системы с учетом рециркуляционного контура, а вторая — эффективный расход свежего воздуха с учетом его снижения за счет рециркуляционного проветривания.

$$C_1 = Q_0 C_0 + Q_{\text{рец}} C_3.$$

Для анализа полученной зависимости построим графики для следующего случая. Пусть имеется проветриваемая рабочая зона с сопротивлением 0,0025 Н·с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup> и суммарным требуемым расходом свежего воздуха по фактору разжижения вредных газов объемом 300 м<sup>3</sup>/с. Аэродинамическое сопротивление выработок главного направления равно 0,025 Н·с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup> (на порядок больше сопротивления выемочного участка).

Для начала рассмотрим вариант с суммарными утечками внутри участка 25 % и размещением рециркуляционной сбойки вне выработок главного направления, то есть параметр  $L$  равен нулю. В таком случае график изменения общего энергопотребления в зависимости от коэффициента рециркуляции описывается кривой, представленной на рисунке 4.5.

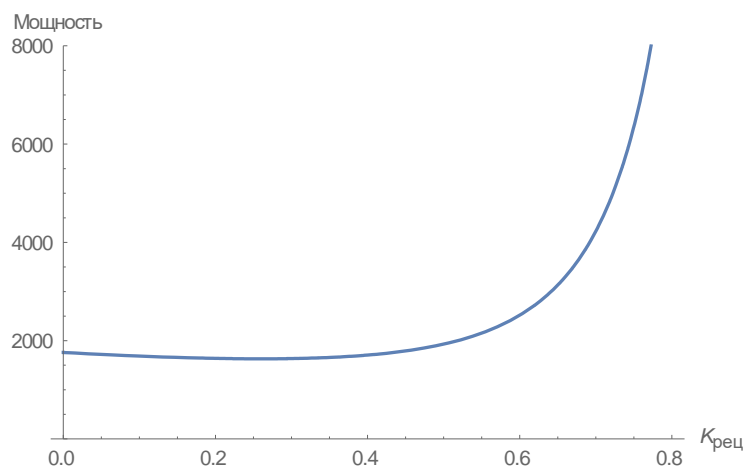


Рисунок 4.5 — Зависимость мощности вентиляторов от коэффициента рециркуляции при внутренних утечках 25 %

В данном случае при увеличении коэффициента рециркуляции происходит снижение суммарного энергопотребления. Резкий рост вызван существенным увеличением расхода внутри рециркуляционного контура при больших коэффициентах рециркуляции и резким возрастанием нагрузки на рециркуляционную установку для поддержания рециркуляции.

Исследуем следующий вариант проветривания этой же системы, когда утечки составляют 50 %. В этом случае при прочих равных параметрах график энергопотребления имеет вид:

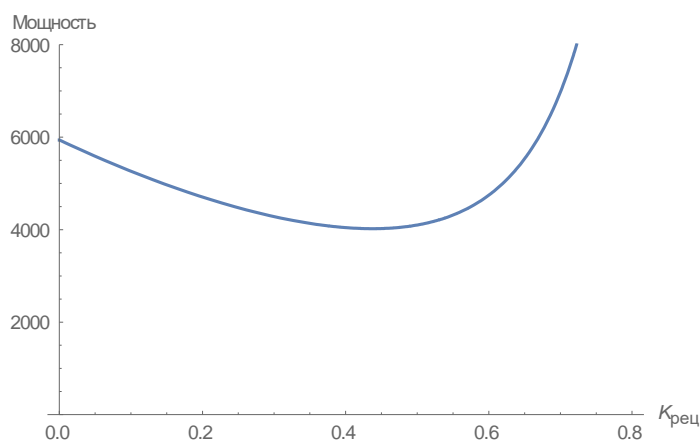


Рисунок 4.6 — Зависимость мощности вентиляторов от коэффициента рециркуляции при внутренних утечках 50 %

В данном случае, если рассмотреть вариант вовлечения рециркуляции в контур с параметром  $L$ , равным 0,2, получим следующую зависимость:

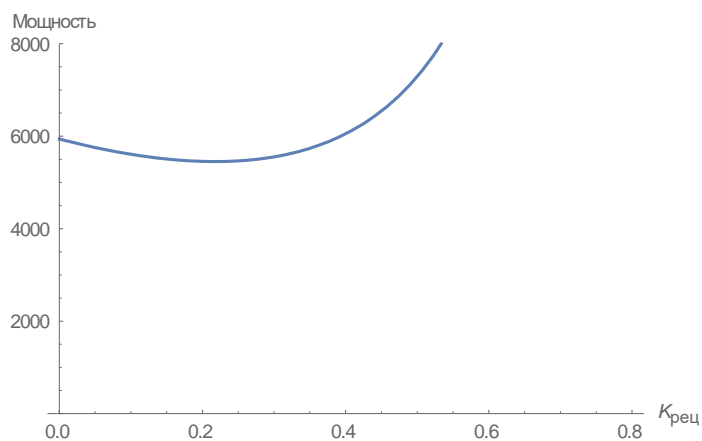


Рисунок 4.7 — Зависимость мощности вентиляторов от коэффициента рециркуляции при внутренних утечках 25 % и включении части аэродинамического сопротивления главных направлений в рециркуляционный контур

Таким образом можно видеть, что суммарное энергопотребление при применении рециркуляции зависит от величины внутренних утечек воздуха внутри рециркуляционного контура и места размещения рециркуляционной установки (доли сопротивления выработок главных направлений, входящих в рециркуляционный контур). Наличие минимума энергопотребления и его величина также зависят от совокупного влияния указанных условий.

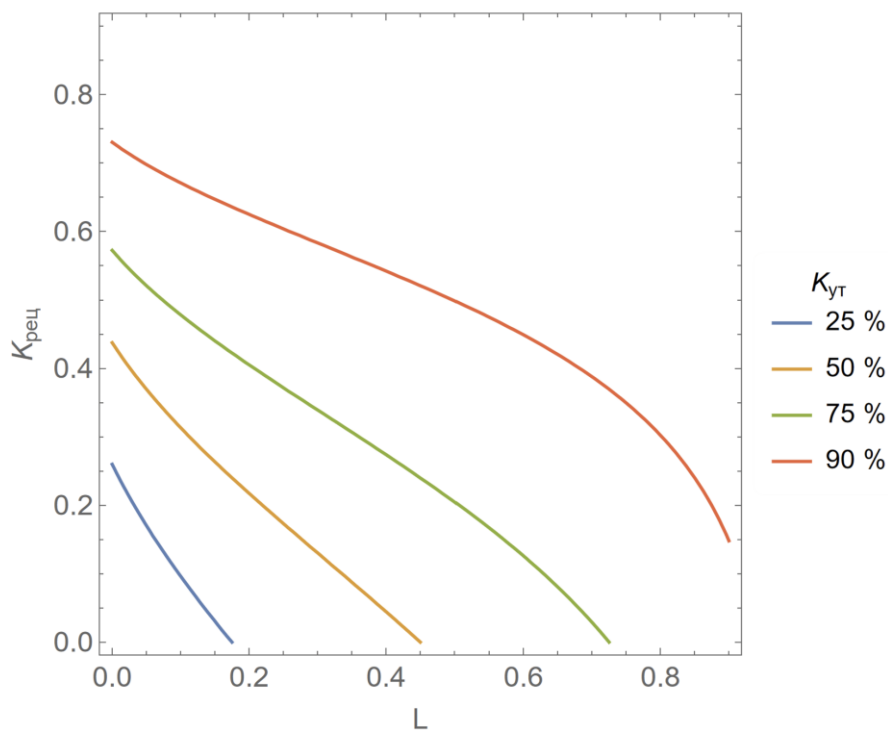


Рисунок 4.8 — Зависимость коэффициента рециркуляции от доли сопротивления выработок главного направления, входящих в рециркуляционный контур

Целесообразность применения и эффективность работы рециркуляционных систем зависит от места их размещения и, следовательно, от сопротивления участков вентиляционной сети до и после рециркуляционной выработки. Например, в случае, когда в рециркуляционный контур входит большая часть сопротивления системы параметры рециркуляционной установки для обеспечения заданного коэффициента рециркуляции могут оказаться соизмеримы с ГВУ, и в этом случае применение рециркуляции не целесообразно.

Для оценки целесообразности применения рециркуляции проведены исследования аэродинамических параметров вентиляционных сетей различных рудников. К аэродинамическим параметрам вентиляционных сетей относятся расход воздуха и перепады давления на участках вентиляционной сети.

### 4.3. Исследование аэродинамических параметров вентиляционных сетей рудников

Аэродинамические параметры участков вентиляционной сети определяются на основании данных воздушно-депресссионных съемок. При отсутствии данных прямых замеров необходимые величины могут быть вычислены по следующим формулам:

$$H_{ГВУ} = \sum H_{ств} + \bar{H}_{кан.ГВУ}, \quad (2.32)$$

$$Q_{ГВУ} = Q_{кан.ГВУ} = Q_{руд} + Q_{внеш.ут}, \quad (2.33)$$

$$\sum H_{ств} = \bar{H}_{вент.ств} + \bar{H}_{возд.ств}, \quad (2.34)$$

$$H_{подз} = \bar{P}_{св} - \bar{P}_{исх}, \quad (2.35)$$

$$Q_{руд} = Q_{вент.ств} = \sum Q_{потр} + \sum Q_{вн.ут}, \quad (2.36)$$

$$K_{ут} = \frac{Q_{руд}}{Q_{руд} - \sum Q_{вн.ут}}, \quad (2.37)$$

где  $H_{ГВУ}$  — депрессия, развиваемая главной вентиляторной установкой, Па;  $\sum H_{ств}$  — сумма перепадов давления на вентиляционном и воздухоподающих стволах, Па;  $\bar{H}_{кан.ГВУ}$  — средняя величина перепада давления в каналах главных вентиляторных установок, Па;  $H_{подз}$  — депрессия подземной части рудника, за исключением стволов, Па;  $\bar{P}_{св}$  — средняя величина приведенного давления на сопряжениях воздухоподающих стволов с выработками горизонта, Па;  $\bar{P}_{исх}$  — средняя величина приведенного давления на сопряжении вентиляционных стволов с выработками горизонта, Па;  $Q_{ГВУ}$  — производительность главной вентиляторной установки, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{кан.ГВУ}$  — расход воздуха в канале главной вентиляторной установки, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{руд}$  — количество воздуха, поступающее в рудник, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{вент.ств}$  — количество воздуха, проходящее по вентиляционному стволу, м<sup>3</sup>/с;

$\Sigma Q_{\text{потр}}$  — суммарное количество воздуха на потребителях (забои, рабочие зоны и камеры служебного назначения), м<sup>3</sup>/с;  $\Sigma Q_{\text{вн.ут}}$  — суммарное количество внутренних утечек воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{внеш.ут}}$  — количество внешних утечек воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $K_{\text{ут}}$  — коэффициент внутренних утечек воздуха.

На первоначальном этапе выполнены исследования вентиляционных сетей калийных рудников Верхнекамского месторождения.

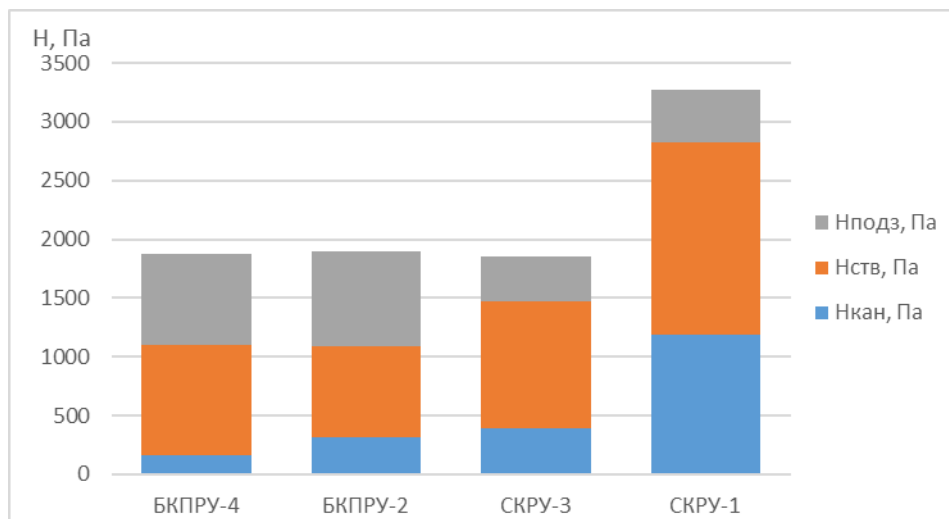


Рисунок 4.9 — Результат измерения аэродинамических параметров на рудниках Верхнекамского месторождения

Результаты измерений, представленные на рисунке 4.9, показывают, что основная часть депрессии, развиваемой главной вентиляторной установкой, затрачивается на преодоление сопротивления стволов и вентиляционного канала. Это говорит о том, что работа рециркуляционных систем в данных условиях эффективна.

Аналогичные исследования выполнены на рудниках месторождения Норильского района и Талнахского месторождения, результаты измерений приведены на рисунках 4.10 и 4.11 соответственно.

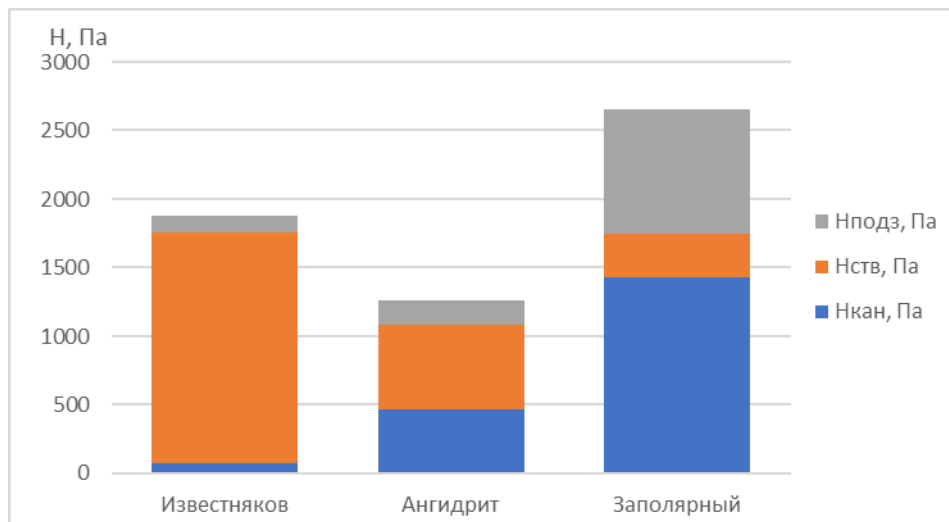


Рисунок 4.10 — Результат измерения аэродинамических параметров на рудниках Норильского района

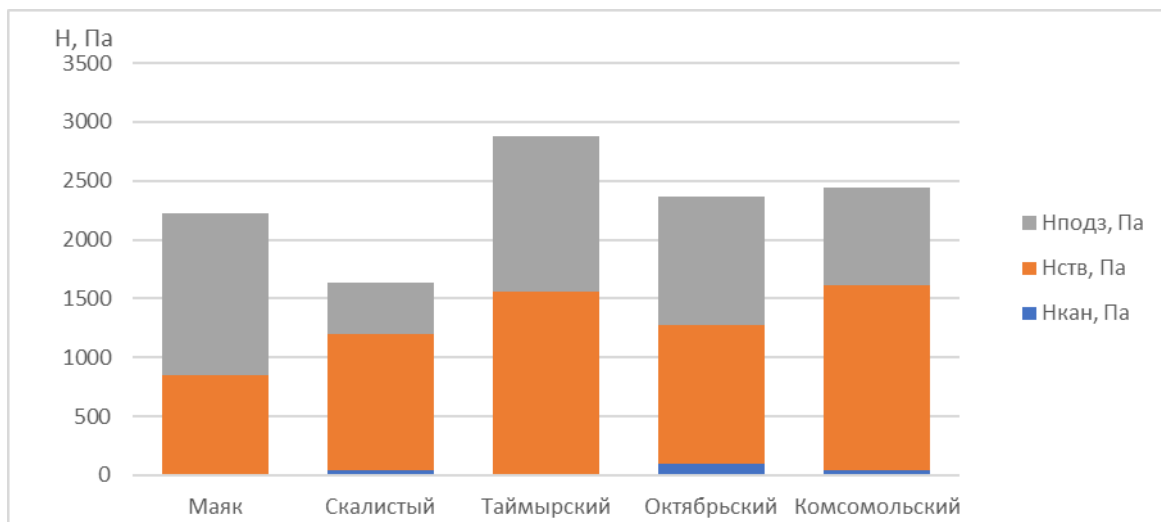


Рисунок 4.11 — Результат измерения аэродинамических параметров на рудниках Талнахского месторождения

На большинстве рассматриваемых рудников основная часть депрессии, развиваемой ГВУ, затрачивается на преодоление сопротивления вскрывающих выработок и вентиляционных каналов, это говорит о том, что на всех рудниках, где депрессия подземной части рудника меньше депрессии вскрывающих выработок применение рециркуляционного проветривания целесообразно и эффективно.

Для выполнения комплексной оценки эффективности применения рециркуляционного проветривания необходимо рассмотреть также сопротивления участков вентиляционных сетей рудников до и после рециркуляционной выработки, коэффициента внутренних утечек и распределения расходов воздуха (таблица 4.1).



Таблица 4.1 — Аэродинамические параметры вентиляционных сетей

Рудник	Количество воздуха, м <sup>3</sup> /с			Аэродинамическое сопротивление, Н·с <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>		K <sub>ут.внутр</sub>
	Q <sub>ГВУ</sub>	Q <sub>руд</sub>	Q <sub>ут.внутр</sub>	R <sub>общее</sub>	R <sub>подз</sub>	
Известняков	256	205	128	0,02861	0,00285	0,62
Ангидрит	442	413	240	0,00646	0,00107	0,58
Заполярный	338	254	85	0,02321	0,01404	0,33
Маяк	378	297	96	0,01555	0,01569	0,32
Скалистый	529	422	119	0,00584	0,00246	0,28
Таймырский	1646	919	250	0,00076	0,00155	0,27
Октябрьский	1638	1337	359	0,00088	0,00061	0,27
Комсомольский	1246	970	162	0,00157	0,00087	0,17
БКПРУ-4	649	620	218	0,00446	0,00202	0,35
БКПРУ-2	308	267	74	0,01994	0,01118	0,28
СКРУ-2	537	362	97	0,00643	0,00293	0,27
СКРУ-3	464	298	90	0,00941	0,00337	0,30
СКРУ-1	615	389	74	0,00864	0,00297	0,19

На основании данных таблицы можно выполнять оценку энергоэффективности применения общешахтной рециркуляции с учетом фактического диапазона величины внутренних утечек воздуха.

#### 4.4. Разработка типовых рециркуляционных схем вентиляции подземных рудников при применении различных схем вскрытия месторождений

Полученные ранее общие закономерности размещения рециркуляционных сбоек и определения параметров рециркуляции применимы для различных схем проветривания рудников.

Расположение выработок учитывает горно-геологические и горнотехнические условия отработки месторождений, также этим обусловлена топология модели вентиляционной сети рудников. В зависимости от особенностей каждого рудника вентиляционные сети в значительной степени отличаются друг от друга по многим параметрам. Однако, учитывая общий принцип организации рециркуляционного проветривания, который заключается в подаче части отработанного воздуха на свежую струю за счет работы источника тяги, можно адаптировать любую вентиляционную систему для применения

рециркуляции, если для этого нет других ограничений. На любом руднике присутствуют аэродинамические связи между воздухоподающими и вентиляционными выработками, которые можно задействовать, или есть возможность проходки рециркуляционных выработок при необходимости, если это целесообразно. Таким образом схему проветривания любого рудника можно преобразовать в рециркуляционную, с учетом аэродинамических особенностей. Далее рассмотрим организацию рециркуляционного проветривания на рудниках различных типов (черным цветом обозначены вскрывающие выработки, желтым цветом выработки горизонтов подземной части рудников, а красным цветом условное место расположения рециркуляционной сбойки).

На рисунке 4.12 представлена принципиальная схема организации рециркуляции при центральной схеме проветривания для пластовых месторождений. Особенностью подобных схем проветривания является значительная протяженность выработок главных направлений, наличие большого количества аэродинамических связей между воздухоподающими и вентиляционными штреками, представленными сбойками, вентиляционными скважинами, уклонами и другими выработками, в которых может быть размещена рециркуляционная установка. Это наблюдается в вентиляционных системах как при пластовом, так и при полевом способе подготовки, что характерно для рудников БКПРУ-2, БКПРУ-4, СКРУ-2 и СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» и для рудников ОАО «Беларуськалий», а именно 1 РУ, 2 РУ, 3 РУ, 4 РУ, Краснослободского и Березовского рудников.

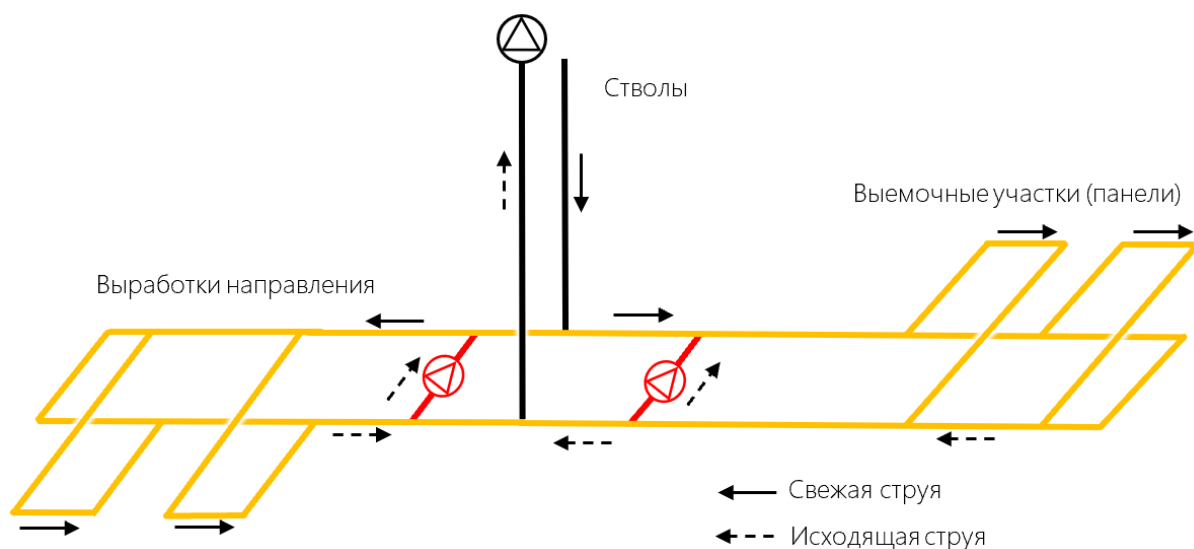


Рисунок 4.12 — Принципиальная схема организации рециркуляционного проветривания при центральной схеме проветривания

Системы вентиляции рудных месторождений характеризуются фланговой схемой проветривания и, как правило, имеют четкое деление на горизонты, свежая струя воздуха подается к местам ведения работ по откаточному горизонту и удаляется на

вентиляционный или вентиляционно-закладочный, в зависимости от системы разработки. Организация рециркуляции, характерная для рудников с фланговой схемой проветривания, приведена на рисунке 4.13, при этом зачастую отсутствуют выработки, которые связывают свежую и исходящую струю и требуется их проходка для последующего размещения рециркуляционных установок. Это отражает особенности аэродинамических схем рудников ПАО «ГМК «Норильский никель» (Скалистый, Таймырский, Комсомольский, Маяк, Октябрьский и Заполярный), а также шахты Ангидрит и шахты Известняков.

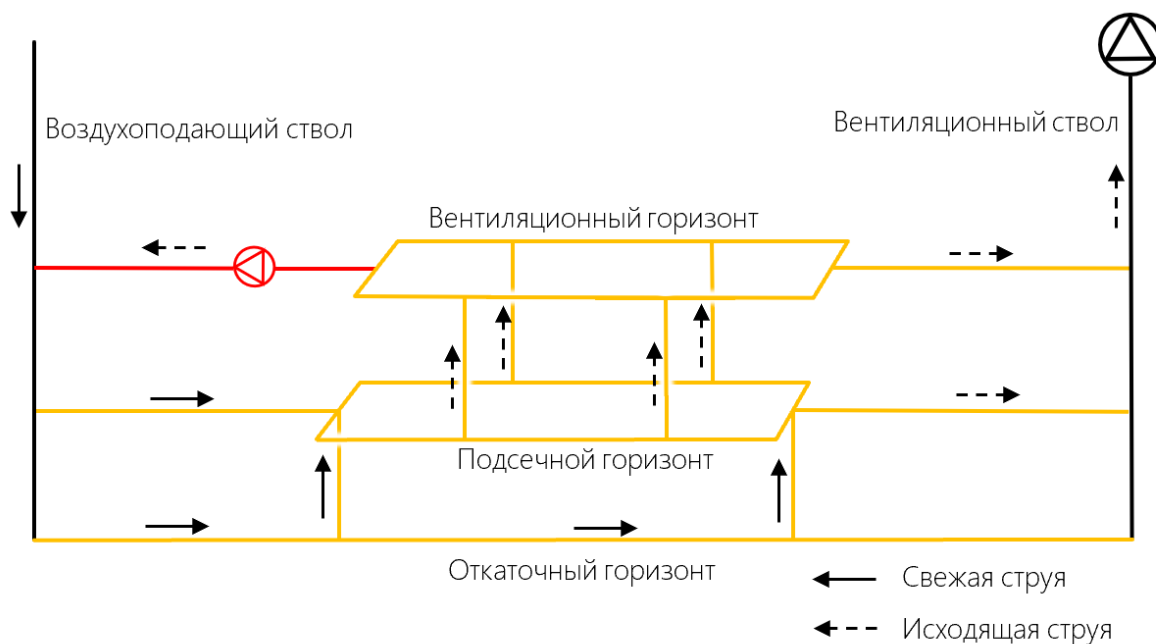


Рисунок 4.13 — Принципиальная схема организации рециркуляционного проветривания при фланговой схеме проветривания

В отдельную группу можно выделить рудники, где сближенно расположенные стволы соединяются с добычными горизонтами квершлагами значительной протяженности, аэродинамические связи между воздухоподающими и вентиляционными выработками, расположенными на различных высотных отметках, практически отсутствуют. Это обуславливает необходимость проходки дополнительных выработок для организации рециркуляционного проветривания или приводит к применению общешахтной рециркуляции, возможности которой ограничиваются параметрами рециркуляционного вентилятора. Схема проветривания, приведенная на рисунке 4.14, показывает принцип организации рециркуляции на рудниках с удаленным расположением сближенных стволов, характерным для рудников Мир и Интернациональный.

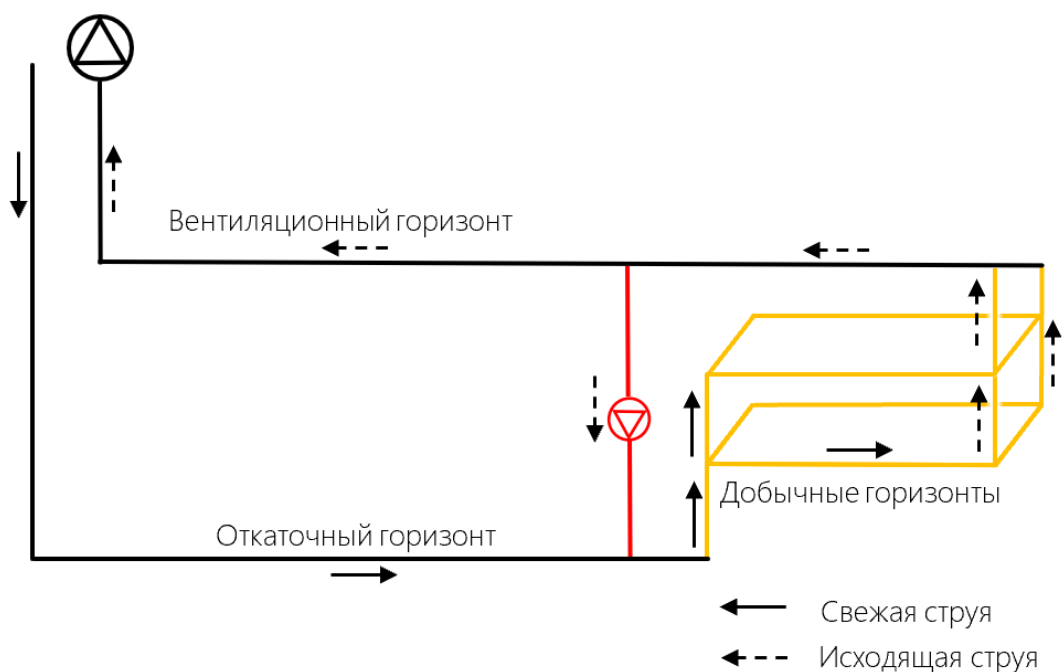


Рисунок 4.14 — Принципиальная схема организации рециркуляционного проветривания на рудниках с удаленным расположением сближенных стволов

При этом при детальной проработке применения рециркуляционных систем на том или ином горном предприятии все условия рассматриваются отдельно. Классификация рециркуляционных систем с учетом особенностей ее организации приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Классификация рециркуляционных систем

Фактор	Описание	Особенности
Масштаб	Забой/рабочая зона/добычной участок/направление/горизонт/рудник	Выбор места размещения и параметров работы рециркуляционной установки с учетом газовой обстановки и критерия энергоэффективности.
Схема проветривания	Прямоточная/возвратночная/центральная/фланговая/комбинированная	Учитывается при выборе места размещения рециркуляционной установки
Влияние на ГВУ	Работа рециркуляционного вентилятора влияет/не влияет на работу ГВУ	Учитывается при выборе параметров работы рециркуляционной установки
Управляемость	Работа рециркуляционной установки в единой автоматизированной системе управления или независимо.	Наличие/отсутствие датчиков контроля и возможности дистанционного регулирования
Схема вскрытия	Центральная, фланговая, центрально-отнесенная.	Учет аэродинамических параметров сети и наличия выработок для размещения рециркуляционной установки.

Приведенную классификацию целесообразно использовать для разработки возможных вариантов организации рециркуляционного проветривания на рудниках и их дальнейшего сравнения.

#### **4.5. Выводы**

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- установлено, что принципиальная возможность применения рециркуляционных установок существует на рудниках любого типа, вне зависимости от схемы проветривания, способа подготовки, порядка отработки и технологии выемки полезного ископаемого;
- выявлена зависимость оптимального места размещения рециркуляционных установок от аэродинамических параметров вентиляционной сети, к которым относятся аэродинамическое сопротивление участков, величина внутренних утечек и степень влияния главной вентиляторной установки;
- построена номограмма зависимости коэффициента рециркуляции от величины сопротивления выработок главных направлений, входящих в рециркуляционный контур с учетом величины внутренних утечек воздуха;
- результат натурных исследований аэродинамических параметров вентиляционных сетей показал, что на большинстве рудников депрессия вскрывающих выработок значительно больше депрессии подземной части и применение рециркуляции на таких рудниках целесообразно;
- Разработана классификация рециркуляционных систем в зависимости от особенностей организации проветривания и топологии вентиляционной сети.

## **5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ**

Глава посвящена разработке методики расчета систем рециркуляционного проветривания, рассматриваются условия их безопасного применения и технические требования к рециркуляционным системам, также приведена методика разработки схемы рециркуляционного проветривания и подтверждена эффективность применения рециркуляции на основании опыта рудников ПАО «Уралкалий» и ОАО «Беларуськалий».

### **5.1. Обоснование условий безопасного применения рециркуляционных систем**

Так как рециркуляционное проветривание подразумевает подачу отработанного воздуха на свежую струю за счет работы источника тяги (рециркуляционной установки) аспект безопасности необходимо рассмотреть в первую очередь, с учетом взаимного влияния источников тяги. В части безопасности применения рециркуляционных систем следует учитывать два основных вопроса:

1. Качество воздуха на исходящей струе.
2. Влияние рециркуляционной установки на проветривание участка.

Установлено, что качество воздуха на исходящей струе определяется мощностью источников газовыделения и величиной утечек внутри рециркуляционного контура, а также количеством подводимого к рециркуляционному контуру свежего воздуха, поэтому в штатном режиме риск возникновения повышенных концентраций ядовитых и взрывоопасных газов практически исключается. Однако в производственных условиях могут возникать ситуации, связанные с нарушением проветривания, и в этом случае возникает вероятность повышения концентраций газов в исходящей струе выше допустимых значений, а это противоречит «Правилам безопасности ...» [66], и такой воздух непригоден для повторного использования. В связи с чем необходима проверка на отсутствие превышения концентраций ядовитых и взрывоопасных газов на исходящей струе в воздухе, поступающем на повторное использование.

Наличие источника тяги, обеспечивающего поступление отработанного воздуха на свежую струю, оказывает влияние на систему проветривания. Степень влияния зависит от множества факторов, таких как место размещения и параметры работы рециркуляционной и главной вентиляторных установок, а также аэродинамические параметры горных выработок по пути движения воздуха до и после места размещения рециркуляционной установки.

Рассмотрим упрощенную схему проветривания, где главная вентиляционная установка (ГВУ) за счет депрессии  $\Delta P$  создает и поддерживает расход воздуха  $Q_1^{(0)}$  через рудник, т.е. через вентиляционный и воздухоподающий стволы. Суммарное аэродинамическое сопротивление стволов, канала ГВУ и участков транспортного и вентиляционного штреков до того места, где предполагается сбойка между ними для размещения рециркуляционного вентилятора, обозначено  $R_1$ . Сопротивление сети от этого места до проветриваемого участка, включая сопротивление данного участка, для увеличения подачи воздуха к которому предполагается организация рециркуляционного проветривания, обозначено  $R_4$ . Предположительно, недостаточный расход воздуха на этом участке —  $Q_4^{(0)}$ . Для упрощения модели все утечки на пути следования воздуха от транспортного штрека к вентиляционному перенесены к месту предполагаемого прохождения вентиляционной сбойки и обозначены расходом  $Q_3^{(0)}$ , а пути утечек имеют суммарное сопротивление  $R_3$  (Рисунок 5.1).

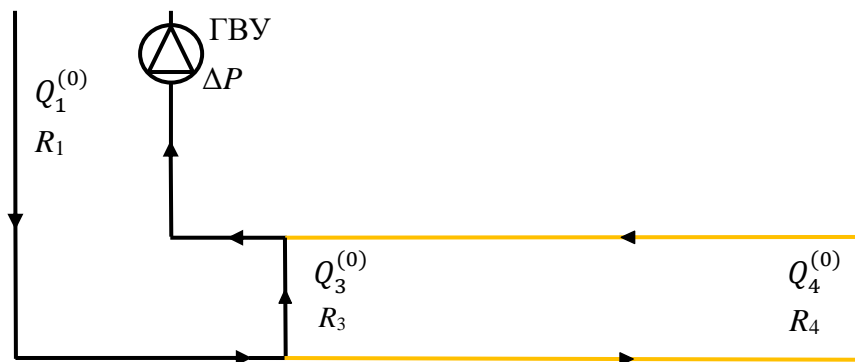


Рисунок 5.1 — Упрощенная схема проветривания рудника без рециркуляционной установки

Для приведенных физических величин используются следующие единицы измерения: депрессия и напор вентилятора (даПа), расходы воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), аэродинамические сопротивления ( $\text{даПа}/(\text{м}^3/\text{с})^2$ ). Уравнения 1-го и 2-го законов сетей схемы, приведенной на рисунке 5.1, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} Q_1^{(0)} = Q_3^{(0)} + Q_4^{(0)} \\ \Delta P = R_1 Q_1^{(0)} |Q_1^{(0)}| + R_4 Q_4^{(0)} |Q_4^{(0)}| \\ R_3 Q_3^{(0)} |Q_3^{(0)}| = R_4 Q_4^{(0)} |Q_4^{(0)}| \end{cases} \quad (5.1)$$

Далее исключением из системы уравнений неизвестных  $Q_1^{(0)}$  и  $Q_3^{(0)}$  получаем расход воздуха через проветриваемый участок:

$$Q_4^{(0)} = \sqrt{\frac{\Delta P}{R_4(1 + R_1/R_{34})}} \quad (5.2)$$

где  $R_{34}$  — суммарное сопротивление двух параллельных участков с сопротивлениями  $R_3$  и  $R_4$  ( $1/\sqrt{R_{34}} = 1/\sqrt{R_3} + 1/\sqrt{R_4}$ ).

В случае применения рециркуляции, а именно размещения рециркуляционной установки в сбойке между воздухоподающей и вентиляционной выработками, появляется напор  $\Delta\pi$ . Упрощенная схема проветривания при применении рециркуляции приведена на рисунке 5.2.

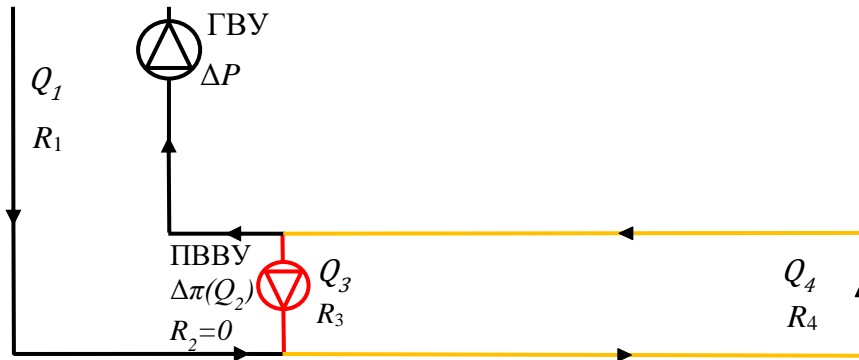


Рисунок 5.2 — Упрощенная схема проветривания рудника при применении рециркуляции

Величина напора  $\Delta\pi$  зависит от расхода  $Q_2$ , который целиком падает на сопротивление  $R_4$ . Напор  $\Delta\pi$  не совпадает с напорной характеристикой вентилятора, так как перемычка, в которой он устанавливается, проницаема для воздуха и является причиной утечек. В результате величина  $\Delta\pi$  уменьшается, поэтому расход воздуха на участке 4 определяется следующим образом:

$$Q_4 = \sqrt{\frac{\Delta\pi}{R_4}}, \quad (5.3)$$

откуда изменение расхода воздуха на участке 4, с учетом выражения (5.2), следующее:

$$\Delta Q_4 = Q_4 - Q_4^{(0)} = \sqrt{\frac{\Delta\pi}{R_4}} - \sqrt{\frac{\Delta P}{R_4(1 + R_1/R_{34})}}. \quad (5.4)$$

Тогда относительное изменение расхода на участке 4 после включения рециркуляционной установки будет:

$$\varepsilon = \frac{\Delta Q_4}{Q_4^{(0)}} = \sqrt{\frac{\Delta\pi}{\Delta P}} \sqrt{1 + \frac{R_1}{R_{34}}} - 1. \quad (5.5)$$



По формуле (5.5) можно сделать некоторые оценки эффективности работы дополнительного вентилятора в подобной ситуации. Не исключен, например, вариант, при котором  $\varepsilon < 0$ , что соответствует “передавливанию” напора вентилятора общешахтной депрессией. В этом случае эффект от применения данного вентилятора отрицателен, так как  $\Delta Q_4 < 0$  означает, что  $Q_2 < 0$  и является дополнительной утечкой в виде встречного потока воздуха. Для реальных ГВУ и рециркуляционных установок  $\sqrt{\Delta\pi/\Delta P} \leq 1/5$  и  $\varepsilon > 0$  при  $\sqrt{1 + \Delta\pi/\Delta P} > 5$ , т.е.  $R_1/R_{34} > 24$ . Поскольку для рассмотрения интересны только те ситуации, для которых  $\varepsilon > 0$ , а  $1 \ll 24$ , то единицей можно пренебречь. В результате получается необходимое условие положительной работы ( $Q_2 < 0$ ) рециркуляционного вентилятора:

$$\Delta\pi > \frac{R_{34}}{R_1} \Delta P. \quad (5.6)$$

Однако выполнение (5.6) еще не означает, что вентилятор будет работать результативно по отношению к увеличению подачи воздуха на участок 4. При соблюдении условия (5.6) результативность может быть рассчитана по формулам (5.4) или (5.5), причем необходимо учесть, что напор любого источника тяги, в том числе и эжектирующего  $\Delta\pi = \Delta\pi(Q_2)$ , является убывающей функцией  $Q_2$  [18]. В противном случае, если задаться конкретным фиксированным значением  $\Delta\pi$ , получается, что чем больше утечки (меньше  $R_3$ ), тем больше  $Q_4$ . Очевидно, что увеличением утечек можно добиться положительной работы рециркуляционного вентилятора, если она была отрицательной, поскольку при этом ослабляется действие общешахтной депрессии на сбойку, в которой он располагается. Но рост утечек не может повысить подачу воздуха на участок 4, так как при этом увеличивается  $Q_2$ , соответственно уменьшается  $\Delta\pi$  и, согласно (5.3), снижается  $Q_4$ . Расход воздуха  $Q_4$  будет тем больше, чем ближе к участку 4 располагается дополнительный вентилятор и чем меньше утечек воздуха между ним и этим участком.

Проведенные аналитические исследования эффективности использования мало-мощных рециркуляционных источников тяги на простых примерах свидетельствуют о том, что в зависимости от условий проветривания эффект может быть как положительным, так и отрицательным и даже приводить к возникновению аварийных ситуаций, связанных с увеличением концентрации вредных примесей на проветриваемых участках до предельно допустимых значений (ПДК) [19].

При разработке систем повторного использования воздуха необходимо учитывать, что вспомогательный источник тяги, обеспечивающий рециркуляцию воздуха, работает против депрессии главного вентилятора. Добавляя часть отработанного воздуха в

свежую струю, он сокращает поступление свежего воздуха тем больше, чем больше дополнительный напор компенсирует общешахтную депрессию в месте установки. Таким образом, вероятность возникновения аварийной ситуации увеличивается на удаленных участках, где достаточно сильно снижается влияние ГВУ. Рассмотрим упрощенный пример проветривания участка по схеме, приведенной на рисунке 5.3.

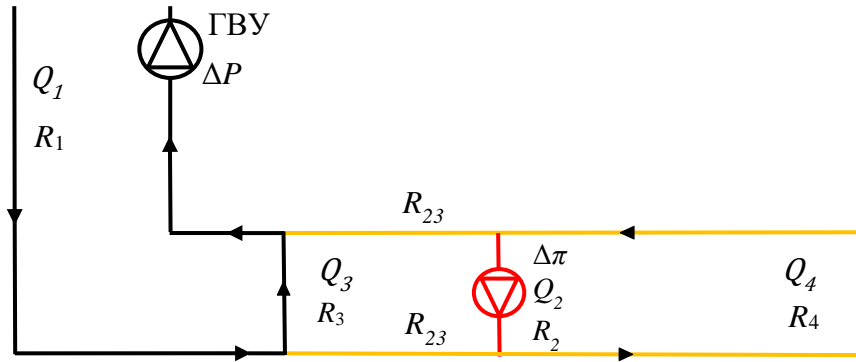


Рисунок 5.3 — Схема рециркуляционного проветривания с утечками воздуха

Все параметры вентиляционной сети, такие как перепады давления, напоры вентиляторов, расходы воздуха и сопротивления участков, выражены в числовом эквиваленте и приняты следующими:

1. Аэродинамические сопротивления участков:  $R_1 = 0,025 \text{ даПа}/(\text{м}^3/\text{с})^2$  — сопротивление сети (5000 м,  $10 \text{ м}^2$ ) до участка (20 м,  $10 \text{ м}^2$ ), моделирующего утечки (сопротивление  $R_3 = 0,001 \text{ даПа}/(\text{м}^3/\text{с})^2$ ;  $R_{23} = 0,001 \text{ даПа}/(\text{м}^3/\text{с})^2$  — сопротивления выработок (500 м,  $10 \text{ м}^2$ ), соединяющих участок утечек и рециркуляционную сбойку ( $R_2 = 0,001 \text{ даПа}/(\text{м}^3/\text{с})^2$ ; 20 м,  $10 \text{ м}^2$ );  $R_4 = 0,001 \text{ даПа}/(\text{м}^3/\text{с})^2$  — сопротивление удаленного участка (500 м,  $10 \text{ м}^2$ ).
2. Напор рециркуляционного вентилятора  $\Delta\pi$  (даПа), депрессия ГВУ  $\Delta P = 500 \text{ даПа}$ .
3. Мощность источника газовыделения  $3 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

Представленная схема параметризована и достаточно проста, но, тем не менее, изучение ее аналитическими методами осложнено, поэтому использовался численный расчет с помощью соответствующего программного обеспечения [49].

Предполагается, что с закрытой сбойкой подача воздуха на участок  $Q_4 = 36 \text{ м}^3/\text{с}$  недостаточна и требуется ее увеличение в 2.5 раза до  $90 \text{ м}^3/\text{с}$ . Модельный вентилятор с напором  $\Delta\pi = 30 \text{ даПа}$  ставится в открытую рециркуляционную сбойку, затем напор понижается с небольшим шагом вплоть до нуля. На каждом шаге рассчитывается стационарное воздухо- и газораспределение на выходе из рабочей зоны (конец выработки № 4). Результаты расчета представлены на рисунке 5.4.

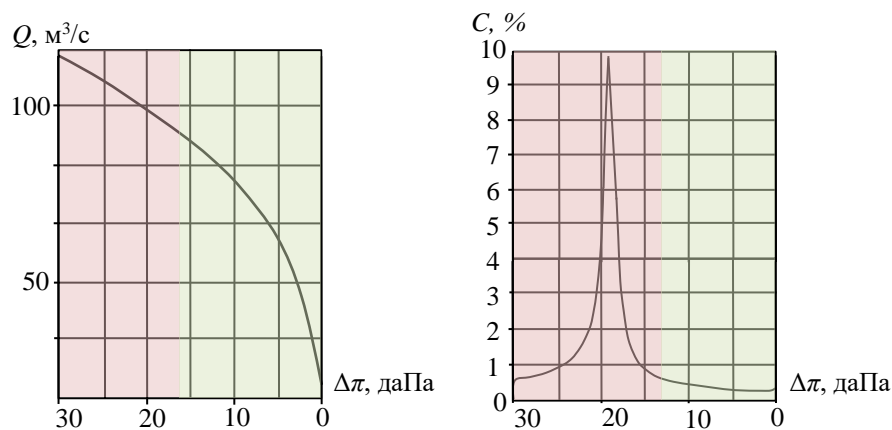


Рисунок 5.4 — Результат расчета стационарного воздухо- и газораспределения и область безопасной работы рециркуляционной установки

По правилам безопасности концентрация метана в выработках рудников, на которых установлен «газовый режим» не должна превышать 0,5%. Из результатов расчета для заданных условий следует, что концентрация метана превышает норму при напоре  $\Delta p$  в диапазоне от 13 до 24 даПа, что соответствует расходам  $Q_4$  от 90 до 110 м<sup>3</sup>/мин. Таким образом, в результате расчета установлено, что увеличение расхода воздуха в 2,5 раза опасно, поскольку достигается 0,5 % концентрация метана, увеличение в 2,7 раза — приводит к аварийной ситуации, связанной с резким увеличением концентрации метана, а увеличение расхода в 3 раза оказывается безопасным. Причина возникновения такой неординарной ситуации заключается в том, что при определенном напоре рециркуляционного вентилятора уравнивается напор ГВУ, падающий на проветриваемый участок. Поступление свежего воздуха в него прекращается и возникает 100 % рециркуляция, происходит «рециркуляционное запираение» воздушного потока. Дальнейшее увеличение напора  $\Delta p$  опрокидывает струю на участках  $R_{23}$  (рисунок 5.3) и поступление свежего воздуха возобновляется в перевернутом виде. Подача свежего воздуха в перевернутом виде является нарушением проветривания и в штатном режиме это недопустимо, поэтому область безопасной работы рециркуляционной установки будет ограничиваться участком пика «рециркуляционного запираения» (рисунок 5.4).

Подобный анализ газовой обстановки в горных выработках в условиях рециркуляционного проветривания может быть проведен для любых источников газовыделения и вредных примесей [30]. Результаты проведенных исследований работы рециркуляционных источников тяги на простых примерах свидетельствуют о том, что в зависимости от условий проветривания эффект от их использования может быть как положительным, так и отрицательным, в том числе приводить к возникновению аварийных ситуаций,

связанных с увеличением концентрации вредных примесей на проветриваемых участках до предельно допустимых концентраций.

Предотвратить эффект прекращения поступления свежего воздуха в проветриваемый участок после установки рециркуляционного вентилятора можно также исключением утечек воздуха до сбоя со стороны главного вентилятора. Однако, как показывает практика, если такая возможность есть, то нет необходимости в организации рециркуляционного проветривания.

## 5.2. Методика разработки схемы и определения параметров рециркуляционного проветривания

Проектирование рециркуляционных систем должно сопровождаться предварительными расчетами их эффективности и безопасности, причем в условиях конкретного рудника, с учетом особенностей проветриваемого участка и с использованием соответствующего программного обеспечения, позволяющего проводить комплексный учет всех факторов, определяющих движение воздушных потоков [20].

При возникновении потребности применения рециркуляционного проветривания на рудниках любого типа следует руководствоваться методикой разработки схемы и определения параметров рециркуляционного проветривания. Для этого изучается существующее воздухораспределение в вентиляционной сети характер действующих там источников загрязнения, выполняется определение аэродинамических параметров вентиляционной сети [57] и потребности в свежем воздухе с учетом применения рециркуляции [11,12] по разработанным методикам с учетом величины внутренних утечек в рециркуляционном контуре, проводится расчет газовой обстановки в вентиляционной сети с учетом механизма диффузии с применением модели конвективно-диффузионного переноса [53,56].

Методика разработки схемы представляет из себя порядок действий, который заключается во всестороннем изучении и поэтапном рассмотрении всех без исключения аспектов, связанных с оптимизацией, эффективностью, расчетами, параметрическим обеспечением, безопасностью и итоговыми требованиями к рециркуляционным системам. Разработка рециркуляционных схем проветривания включает:

1. Определение **возможности** применения рециркуляции, которая основывается на анализе качества воздуха исходящей струи.

2. **Эффективность** применения рециркуляции, включающая разработку схем рециркуляции, расчеты, моделирование, определение места и параметров рециркуляционной установки.
3. **Безопасность** применения рециркуляции, в части которой рассматривается применение средств контроля и мероприятия по повышению безопасности.

### **5.2.1. Исследования качества воздуха исходящей струи**

Исследования качества воздуха исходящей струи выполняются с целью определения пригодности воздуха для повторного использования, при этом основное внимание уделяется газовому фактору, но также учитывается фактор пыли и микроклиматические условия. На действующих рудниках вывод о возможности применения рециркуляции выполняется на основании натуральных измерений микроклиматических условий, пылевого и газового состава воздуха на исходящей струе из рабочих зон, блоков, панелей, участков, горизонтов, направлений и рудника в целом с учетом проводимых технологических операций и особенностей. На проектируемых рудниках следует руководствоваться данными проекта по применяемой технике и газовыделениям из массива и проводить оценку качества воздуха на исходящей струе путем расчета в специализированных программных комплексах, оценка микроклиматических условий выполняется на основании данных о геотермической ступени региона и других факторов, влияющих на формирование теплового режима. Этапы исследований можно представить схематично (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5 — Определение возможности применения рециркуляции

В ходе исследований рассматривается вопрос возможности применения рециркуляционного проветривания на руднике, выполняется предварительная оценка его локализации и масштабов.

### 5.2.2. Разработка модели вентиляционной сети и расчет воздухо-газораспределения

Разработка модели включает создание топологии вентиляционной сети, задание необходимых свойств всем объектам, валидация модели по воздухо-газораспределению, задание действующих источников газовой выделению и непосредственно расчет распространения газа в модели вентиляционной сети и проверка модели по газораспределению. При этом если для расчета стационарного воздухо-газораспределения в свойствах выработок достаточно задать аэродинамическое сопротивление, то обязательными условиями корректности расчета газораспределения является также задание геометрических параметров выработок (длины и площади поперечного сечения в свету). Параметры источников газовой выделению принимаются в зависимости от типа применяемого оборудования

(мощность и характер работы машин с ДВС) или от технологических процессов (газовыделение из массива или газовыделение от взрывных работ). Все источники газовыделения можно разделить по времени действия на постоянные и временные, а по характеру работы на локальные и распределенные. Мощности источников газовыделения могут быть заданы по данным интенсивности (количество выделившегося газа с учетом длины участка газовыделения) или на основании замеров концентрации газа и расхода воздуха, при этом специфика определения мощности источников варьируется и зависит от их типа [47]. Рассмотрим основные источники газовыделений и особенности их учета при расчете газораспределения.

**Газовыделение от машин с двигателями внутреннего сгорания.** Машины с ДВС обязательны к учету при расчете газораспределения, основными особенностями являются нестационарность и цикличность их работы, для определения мощности источника используются технические характеристики двигателя или замеры концентрации газов на исходящей струе после источника.

**Газовыделение из массива.** Является обязательным к учету, основные особенности - постоянство места расположения и интенсивность по времени расчета, мощность источника задается на основании газовых съемок для действующих рудников или по данным газоносности и газообильности с ближайшего действующего участка со схожими условиями для проектируемых рудников. Так как в ходе газовой съемки определяется относительная газообильность всех рабочих зон, которая и является количеством выделяемого при отбойке газа в единицу времени, то эти данные могут использоваться непосредственно в качестве мощности источника газовыделения.

**Газовыделение от взрывных работ.** Этот источник локализован и стационарен. Следует учитывать для оценки достаточности времени проветривания после взрывных работ, мощность источника зависит от количества и типа одновременно взрываемого ВВ [44].

**Дополнительные источники газовыделения.** К ним относятся камеры служебного назначения, отбитая горная масса на складах и конвейерных линиях и прочие источники, действие которых может привести к возникновению ненулевой концентрации газа на свежей струе. Необходимость учета рассматривается отдельно на каждом исследуемом объекте.

Мощности источников газовыделения могут приниматься на основании прямых замеров, рассчитываться по техническим характеристикам применяемого оборудования или с использованием данных плановых газовых съемок, в случае если они проводятся

на руднике (так как в ходе газовой съемки определяется относительная газообильность всех рабочих зон, которая и является количеством выделяемого при отбойке газа в единицу времени).

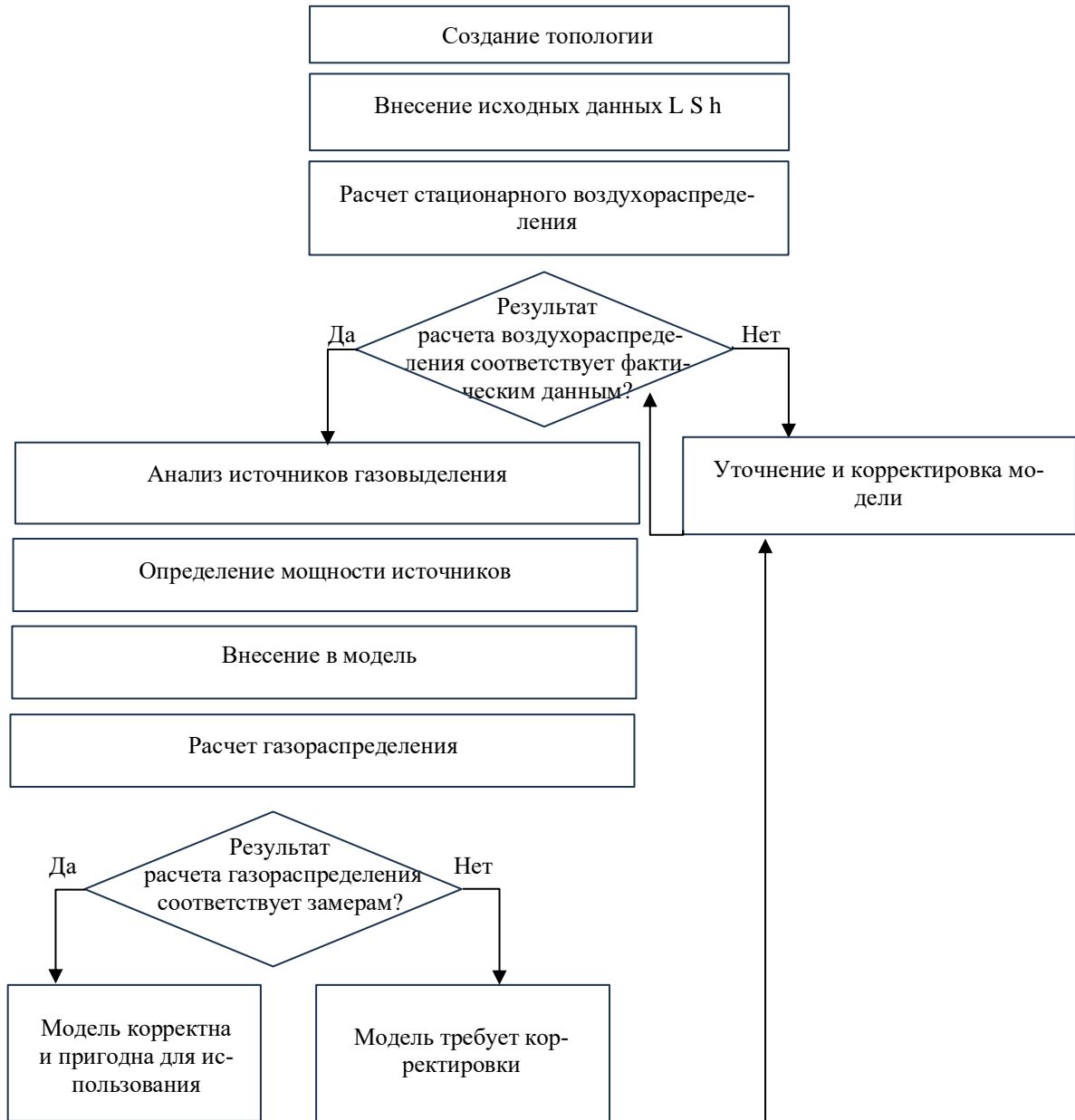


Рисунок 5.6 — Создание модели вентиляционной сети и внесение исходных данных

В ходе исследований выполняется проверка модели, расчеты газораспределения для различных вариантов комбинации источников газовыделения, соответствующих положению горных работ и других технологических процессов, по результатам расчета делается вывод о том при каких условиях создается наиболее пессимистичная газовая обстановка в горных выработках рудника, это обстоятельство учитывается далее при определении места размещения рециркуляционной установки.



### **5.2.3. Разработка схемы рециркуляционного проветривания и определение места размещения рециркуляционной установки**

Разработка схемы рециркуляционного проветривания заключается в детальном исследовании вентиляционной сети рудника на предмет наличия мест для организации подачи исходящей струи воздуха в свежую. К таким местам относятся соединяющие воздухоподающие и вентиляционные выработки. Для действующих рудников на основании анализа вентиляционной сети определяется перечень вариантов, в случае если ни одна существующая выработка не подходит для организации рециркуляции, то рассматривается вопрос возможности проходки дополнительной выработки. Для проектируемых рудников место размещения рециркуляционной установки определяется на основании анализа вентиляционной сети, и рециркуляционная выработка закладывается заранее с учетом календарного графика развития горных работ. В обоих случаях выбирается перечень вариантов организации рециркуляции для их дальнейшего сравнения и определения наилучшего с точки зрения эффективности и безопасности. И для действующих, и для проектируемых рудников рассматриваются следующие варианты размещения рециркуляционных систем с точки зрения масштаба их применения:

- 1) **Общешахтное рециркуляционное проветривание.** При применении общешахтной рециркуляции внутри рециркуляционного контура находятся все рабочие зоны и камеры служебного назначения рудника, а рециркуляционная установка располагается в выработке, соединяющей воздухоподающие и вентиляционные стволы в околоствольном дворе или в непосредственной близости от него. Преимуществами общешахтной рециркуляции является задействование меньшего количества элементов системы (вентиляторов, датчиков итд) и, как следствие, хорошая управляемость и легкость регулирования производительности вентиляторных установок. К недостаткам такого способа размещения можно отнести мощное взаимное влияние главной вентиляторной и рециркуляционной установок, это приводит к тому, что для преодоления напора ГВУ параметры рециркуляционной установки зачастую становятся соизмеримыми с параметрами ГВУ, что делает применение рециркуляции нецелесообразным.
- 2) **Рециркуляционное проветривание на направлении/горизонте.** Установка располагается в выработке, соединяющей главные воздухоподающие и вентиляционные выработки, это может быть сбойка, вентиляционный восстающий, скважина и др., а рециркуляционный контур включает в себя

выемочные участки направления/горизонта, на котором применяется рециркуляция и часть камер служебного назначения (в зависимости от их места расположения относительно рециркуляционной выработки). Преимуществами такого способа является меньшее взаимное влияние вентиляторов, чем в случае общешахтной рециркуляции и, как следствие, возможность применения в качестве рециркуляционной установки менее мощных вентиляторов. Взаимосвязь элементов системы усложняется, особенно в случае применения рециркуляции на нескольких направлениях, но сохраняется возможность простоты и оперативности регулирования производительности вентиляторов, также появляется более острая необходимость перераспределения воздуха между направлениями.

- 3) Рециркуляционное проветривание в пределах выемочного участка (одна рециркуляционная установка расположена в пределах одного участка рудника). Рециркуляционный контур при этом включает один выемочный участок. Преимуществом такого расположения рециркуляционных систем является возможность регулирования количества повторно используемого воздуха на конкретном участке при использовании маломощных вентиляторов. Для повышения эффективности такими системами должны быть оборудованы все добычные участки с возможностью регулирования подачи воздуха на каждый из них, это подразумевает большое количество элементов системы и сложность ее регулирования. Также наличие источника тяги оказывает значительное влияние на проветривание самого участка и возникает вероятность опрокидывания воздушной струи в случае, если влияние ГВУ незначительно, что означает угрозу безопасности проветривания.

Окончательный выбор места размещения рециркуляционной установки выполняется в соответствии с разделом 4.2.



Рисунок 5.7 — Разработка схем рециркуляционного проветривания

Таким образом разработка схемы рециркуляционного проветривания заключается в детальном анализе вентиляционной сети с точки зрения ее топологии, особенностей схемы вскрытия, и системы разработки и аэродинамических параметров. На основании данных исследований определяются возможные варианты размещения рециркуляционной установки.

#### 5.2.4. Определение коэффициента рециркуляции и параметров рециркуляционной установки

Расчет количества воздуха для рудника и рабочей зоны при применении рециркуляционного проветривания выполняется по универсальной методике, приведенной в разделе 4.2. Согласно разработанной методике, определение коэффициента рециркуляции выполняется по номограмме с учетом величины внутренних утечек воздуха внутри рециркуляционного контура. При выбранном коэффициенте утечек на участке допускается любая рециркуляция, не достигающая 100 %. Она может быть ограничена либо техническими возможностями вентиляторной установки, либо появлением риска снижения подачи свежего воздуха до нуля, что эквивалентно возникновению 100 % рециркуляции. С учетом этого требования производится расчет граничных параметров рециркуляционной установки, при которых снижается подача свежего воздуха. В связи с этим для обеспечения устойчивых параметров рециркуляционного проветривания рекомендуется

коэффициент рециркуляции принимать не более 80 %. Допускается и большая величина при условии обеспечения подачи свежего воздуха в контур.

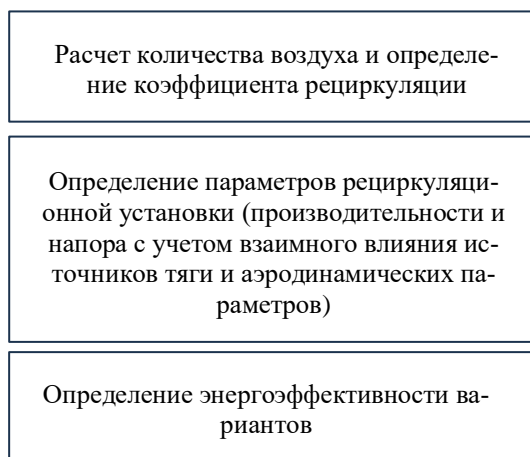


Рисунок 5.8 — Определение параметров рециркуляционной установки

Таким образом на данном этапе определяется количество свежего и количество повторно используемого воздуха (производительность рециркуляционной установки), а также на основании этих данных выполняется подбор типа вентилятора рециркуляционной установки. По результатам определения параметров рециркуляционной установки производится расчет суммарной потребляемой мощности всех источников тяги и выполняется сравнительный анализ вариантов по энергоэффективности. Далее необходимо выполнить проверку условий безопасности.

### 5.2.5. Проверка условий безопасности применения рециркуляции

Соблюдение условий безопасности первостепенная задача проветривания, особенно при применении рециркуляции. Проверка условий безопасности относится ко всем элементам рециркуляционной системы, а также затрагивает и элементы системы проветривания рудника в целом. К условиям безопасности относятся как непосредственно технические средства контроля и мероприятия, включающие комплекс действий, направленных на поддержание безопасности проветривания, так и расчеты, проводимые для проверки условий безопасности, а именно расчет газораспределения при включении рециркуляции и расчет устойчивости воздушных потоков для проверки вероятности возникновения опрокидывания воздушной струи по причине изменения сопротивления выработок.

Можно выделить следующие основные группы мероприятий по безопасности:

- Контроль расхода воздуха и концентрации газов на свежей струе после смешения струй.

- Контроль расхода воздуха и концентрации газов в рециркуляционной сбойке для своевременного исключения попадания непригодного для повторного использования воздуха на свежую струю.
- Контроль расхода воздуха и концентрации газов на свежей струе в выработках, подходящих к контуру для обеспечения подачи в контур требуемого количества свежего воздуха.
- Обеспечение возможности изменения производительности ГВУ при отключении/включении рециркуляционной установки и мероприятия по оптимизации горных работ при невозможности увеличения производительности ГВУ.
- Мероприятия при превышении концентрации газов внутри рециркуляционного контура.

При этом набор мер безопасности в каждом случае применения рециркуляции рассматривается отдельно в зависимости от условий системы проветривания конкретного рудника.



Рисунок 5.9 — Обеспечение безопасности рециркуляционного проветривания

При рассмотрении возможности применения рециркуляционных систем главный критерий — это обеспечение условия безопасности, включающего проверочные расчеты, контроль, требования и мероприятия, особенно с учетом того, что в настоящее время требуется разработка обоснования безопасности опасного производственного объекта. Рассмотрение каждого аспекта применения рециркуляционных систем в отдельности позволило объединить этапы разработки системы рециркуляционного проветривания в единую схему (Рисунок 5.10).

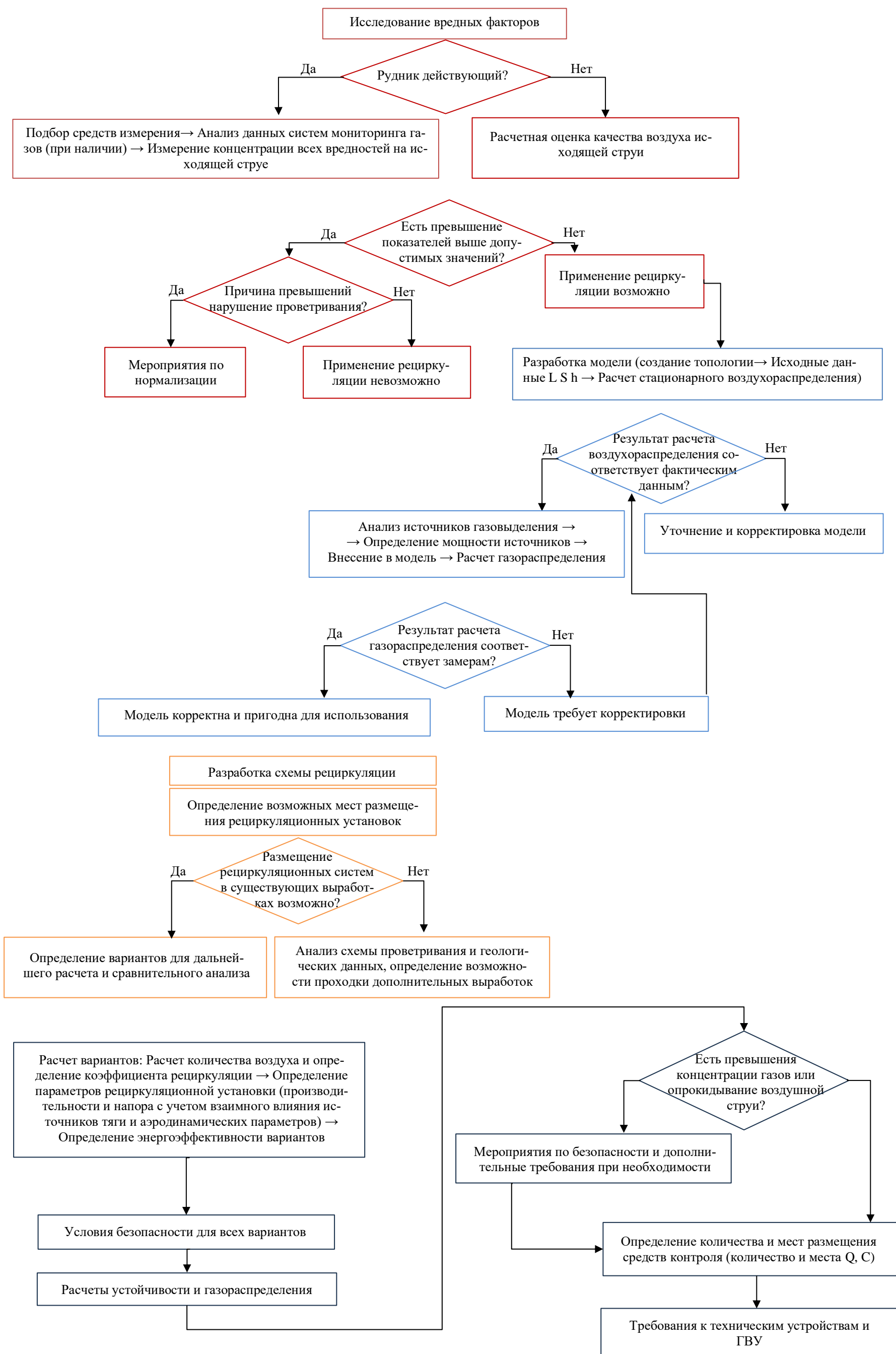


Рисунок 5.10 — Схема разработки рециркуляционного проветривания рудника

### 5.3. Технические требования к рециркуляционным вентиляторным установкам

Вентиляторные установки, предназначенные для организации рециркуляционного проветривания, должны обеспечивать возможность увеличения эффективности проветривания с соблюдением условий безопасности. Таким образом общие требования можно разделить на две группы: это требования непосредственно к рециркуляционным установкам и требования к дополнительному оборудованию.

Для обеспечения максимально эффективной работы рециркуляционная установка должна иметь минимальное аэродинамическое сопротивление, тем самым на преодоление собственного сопротивления будет уходить наименьшее количество энергии рециркуляционной установки.

Так как рециркуляционные установки работают «против» напора ГВУ, должны преодолевать сопротивление выработок в рециркуляционном контуре, которое в свою очередь может изменяться в процессе работы, то рециркуляционная установка должна обеспечивать максимально возможный напор.

Условия, в которых применяются рециркуляционные установки, могут достаточно сильно отличаться, а также в зависимости от условий и специфики рудника могут варьироваться коэффициенты рециркуляции. Поэтому рециркуляционная установка должна обеспечивать максимально возможный коэффициент рециркуляции, а так как он может варьироваться в широком диапазоне, то и оперативное регулирование производительности. Регулирование производительности также важно при необходимости ее снижения в случае, когда максимальная производительность рециркуляционной установки превышает максимально возможное количество повторно используемого воздуха. Также изменение производительности рециркуляционной установки должно обеспечивать быстроту реагирования в случае фиксирования повышения концентрации газов.

Условием безопасной эксплуатации рециркуляционной установки при возникновении аварийной ситуации является недопущение попадания загазованного воздуха на свежую струю как с вентиляционных штреков на транспортные, так и в обратном направлении.

Кроме технических требований к самой вентиляторной установке есть также требования к газовому составу рудничной атмосферы и расходу воздуха в месте размещения рециркуляционной установки и, как следствие, требования к месту размещения дополнительных устройств, позволяющих контролировать эти параметры (датчики концентрации газов и датчики скорости воздуха). При отсутствии контроля параметров работы

рециркуляционной установки и без дистанционного управления рециркуляционной установкой не представляется возможным оперативное реагирование, таким образом может возникнуть угроза безопасности проветривания. Для обеспечения дистанционного управления и контроля необходим вывод информации о работе рециркуляционных установок и вспомогательного оборудования на поверхность.

В состав рециркуляционной установки входит:

- вентилятор;
- датчики концентрации газов (перечень измеряемых параметров определяется условиями применения);
- измерители скорости воздушного потока (устанавливаются в рециркуляционной выработке, в выработках с исходящей струей и на свежей струе в выработках, подходящих к контуру);
- устройство перекрытия рециркуляционной выработки в аварийной ситуации;
- местное и дистанционное управления установкой.

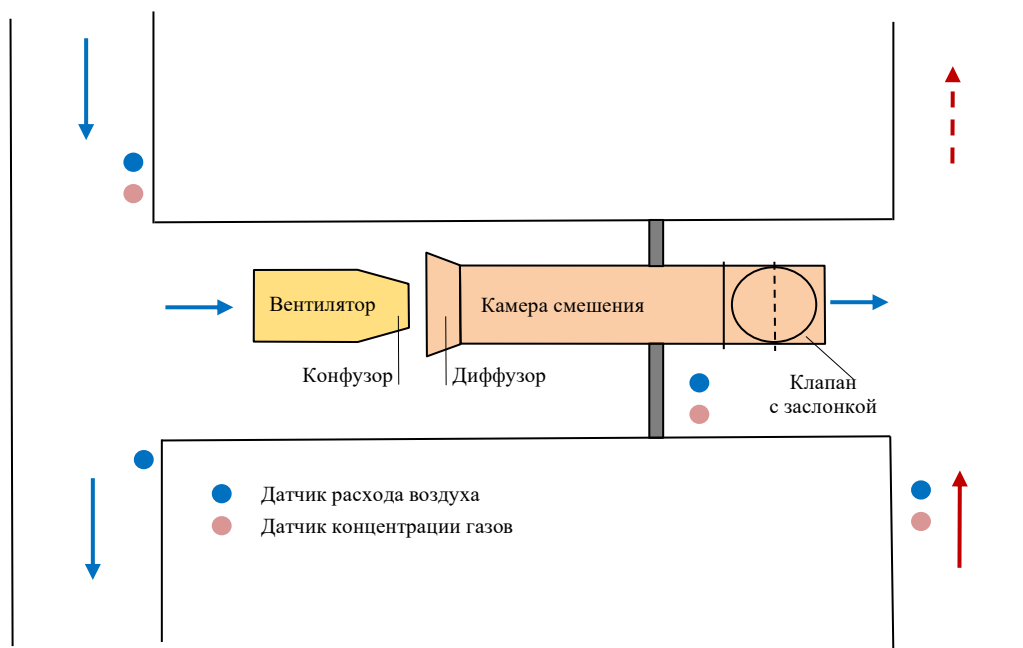


Рисунок 5.11 — Рециркуляционная установка

Комбинирование параметров элементов рециркуляционной установки, к которым относятся длина и диаметр конфузора, длина и диаметр камеры смешения, позволяет варьировать ее производительность в широком диапазоне.



Также для повышения эффективности и безопасности проветривания предъявляется ряд требований не только непосредственно к рециркуляционным установкам, но и к системе проветривания в целом:

1. Реализация системы аэрогазового контроля, в том числе измерение концентраций горючих ( $\text{CH}_4$ ) и ядовитых ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) газов, а также кислорода  $\text{O}_2$  в горных выработках, по которым осуществляется движение исходящей струи воздуха с участка шахтного поля на котором имеется вентиляционный контур с частичным повторным использованием воздуха.
2. Обеспечение вывода показаний системы аэрогазового контроля диспетчеру рудника.
3. Реализация возможности дистанционного управления и отключения диспетчером шахтных вентиляторных установок, выполняющих роль рециркуляционной установки.
4. Оснащение главных вентиляторных установок частотным преобразователем тока для возможности плавного регулирования производительности агрегата.
5. Разработка и реализация алгоритма системы автоматической взаимосвязанной работы шахтных вентиляторных установок, автоматических регуляторов воздухо-распределения, системы аэрогазового контроля и главной вентиляторной установки.

Схематично работа рециркуляционной установки в комплексе с другими элементами, повышающими безопасность и эффективность системы вентиляции в целом, представлена на рисунке 5.12.



#### 5.4. Опыт внедрения систем рециркуляционного проветривания на рудниках ОАО «Беларуськалий» и ПАО «Уралкалий»

На рудниках России и Беларуси накоплен богатейший многолетний опыт применения рециркуляционных систем. Наиболее характерными примерами внедрения рециркуляционных систем являются калийные рудники производственных объединений Уралкалий и Беларуськалий, где рециркуляция применяется практически на всех рудниках. Опыт показал, что при частичном повторном использовании воздуха повышается эффективность проветривания рабочих зон и снижаются энергозатраты на проветривание без угрозы безопасности ведения горных работ, это подтверждается результатами натурных исследований и статистическими данными об отказах оборудования и несчастных случаях на рудниках.

При расчете рециркуляционных систем применяются различные подходы, эти различия обусловлены требованиями нормативных документов, особенностями вентиляционных сетей рудников и спецификой работы существующих вентиляционных устройств и объектов.

Основным критерием оценки эффективности применения рециркуляционных систем является снижение энергозатрат на проветривание. Суммарные годовые затраты электрической энергии (кВт·час) главной вентиляторной установкой в зависимости от ее производительности и системой воздухоподготовки с учетом длительности отопительного периода определяются следующим выражением:

$$\Delta A = \frac{8760 \cdot 9,81 \cdot R \cdot (Q_1^3 - Q_2^3)}{1000 \cdot \eta} + \frac{N_{от} \cdot (G_1 - G_2) \cdot c_v \cdot (t_{кан} - t_n)}{1000}, \text{ кВтч в год,} \quad (5.6)$$

где  $R$ , кмюрг — аэродинамическое сопротивление рудничной вентиляционной сети, на которую работает вентилятор;

$Q$  — производительность ГВУ, м<sup>3</sup>/с;

$\eta$  — КПД вентиляторной установки;

$N_{от}$  — количество дней отопительного периода;

$c_v = 1004 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$  — удельная теплоемкость воздуха;

$G$ , кг/с — массовый расход воздуха;

$t_n$ , °С — расчётная температура наружного воздуха;

$t_{кан} = +2$  °С — требуемая температура воздуха, поступающего в рудник.

Рассмотрим применение рециркуляционных систем на примере рудников упомянутых производственных объединений.

### 5.4.1. Рециркуляционная система рудника БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий»

Внедрение рециркуляции в составе системы автоматизированного управления проветриванием на руднике БКПРУ-4 произошло в 2015 году. Частичное повторное использование воздуха организовано за счет работы четырех рециркуляционных установок, по одной на каждом направлении рудника. Упрощенная схема проветривания и места размещения рециркуляционных установок приведены на рисунке 5.13.

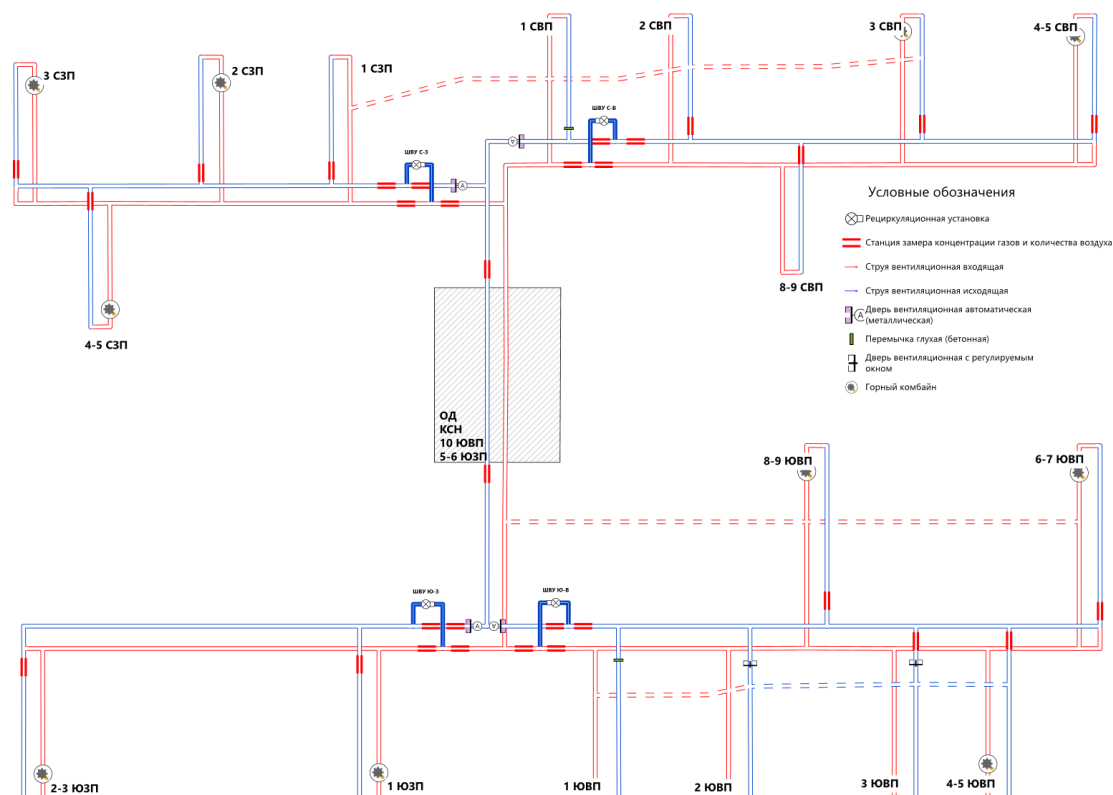


Рисунок 5.13 — Упрощенная схема проветривания рудника БКПРУ-4 и места размещения рециркуляционных установок

Установки оснащены датчиками расхода воздуха и датчиками концентрации газов, которые являются элементами системы рециркуляционного проветривания, детально места их размещения показаны на рисунке 5.14 на примере северо-западного направления.

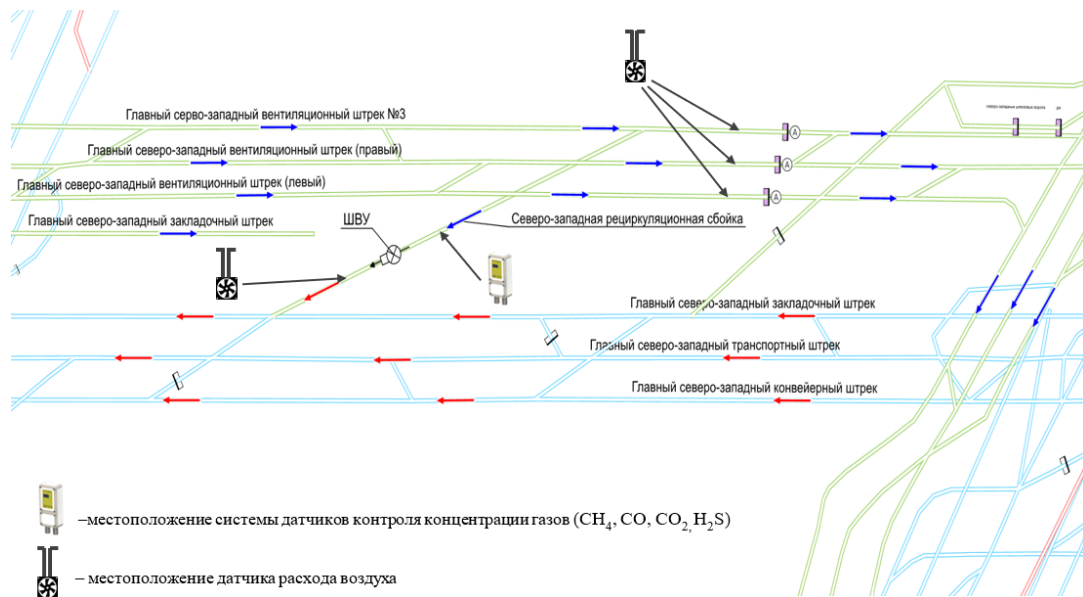


Рисунок 5.14 — Размещение элементов системы на северо-западном направлении рудника



Рисунок 5.15 — Рециркуляционная система ПАО «Уралкалий»

При этом величина коэффициента рециркуляции зависит от концентрации газов на исходящей струе, направляющейся на повторное использование, и рассматриваемого газового компонента (метан или сероводород). В случае, когда расчетная производительность рециркуляционной установки больше, чем техническая, принимается максимальное значение производительности по техническим характеристикам.

Таким образом максимальная производительность ограничена величиной коэффициента рециркуляции по газовому фактору, технической производительностью рециркуляционной установки или не должна превышать 70 % от расчетного значения расхода воздуха на направлении.

После внедрения рециркуляционных систем на руднике появилась возможность снижения частоты вращения рабочего колеса ГВУ с 400 до 320 об/мин, это обеспечивает снижение производительности ГВУ с 649 до 463 м<sup>3</sup>/с, тем самым энергопотребление ГВУ снижается с 3050 до 1370 кВт. Также при применении рециркуляции в холодный период года требуется подогреть меньшее количество воздуха и тепловая мощность систем воздухоподготовки снижается с 10,1 до 6,5 МВт. Снижение энергозатрат на проветривание и воздухоподготовку приведено графически на рисунке 5.16.

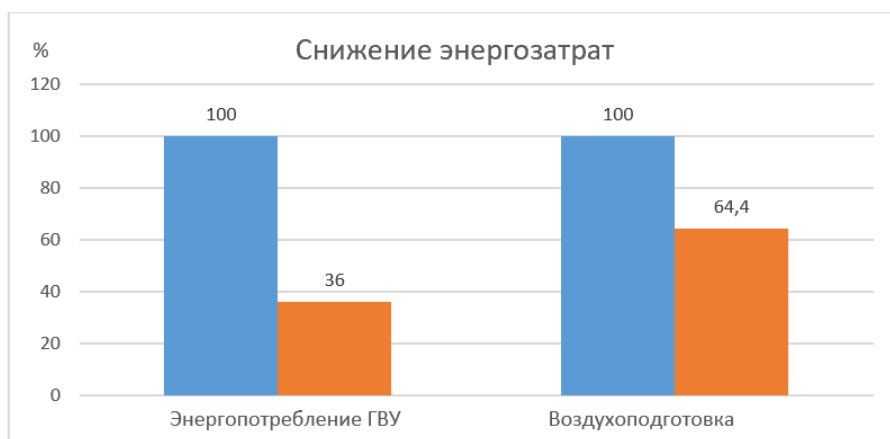


Рисунок 5.16 — Энергозатраты на проветривание и воздухоподготовку до и после внедрения рециркуляционных систем

Суммарное снижение энергозатрат на проветривание и воздухоподготовку рассчитывается по формуле 5.6 и составляет:

$$\begin{aligned} \Delta A &= \frac{8760 \cdot 9,81 \cdot 0,006624 \cdot (649^3 - 463^3)}{1000 \cdot 0,55} \\ &+ \frac{4320(833,3 - 594,5) \cdot 1004 \cdot (2 - (-8,9))}{1000} \\ &= 195\,860\,827, \text{ кВтч в год.} \end{aligned}$$

Стоит отметить, что экономия электроэнергии за счет применения рециркуляционных систем может быть больше при наличии возможности увеличения точности регулирования производительности ГВУ (в настоящее время техническая возможность плавного изменения частоты вращения рабочего колеса отсутствует).



Также по данным специалистов рудника за все время эксплуатации рециркуляционных систем не зафиксировано ни одной аварийной ситуации, связанной с нарушением проветривания или с накоплением газовых примесей в горных выработках рудника.

### 5.4.2. Рециркуляционная система рудника ЗРУ ОАО «Беларуськалий»

Система рециркуляции на руднике ЗРУ внедрена и введена в эксплуатацию более десяти лет назад в составе автоматизированной системы управления проветриванием. Горные работы ведутся на двух горизонтах рудника, соединенных между собой вертикальными стволами. Горизонты разделяются на направления и на каждом главном направлении рудника размещены рециркуляционные установки на базе вентилятора ВМ-12. Места размещения рециркуляционных установок и других элементов системы приведены на рисунке 5.17.

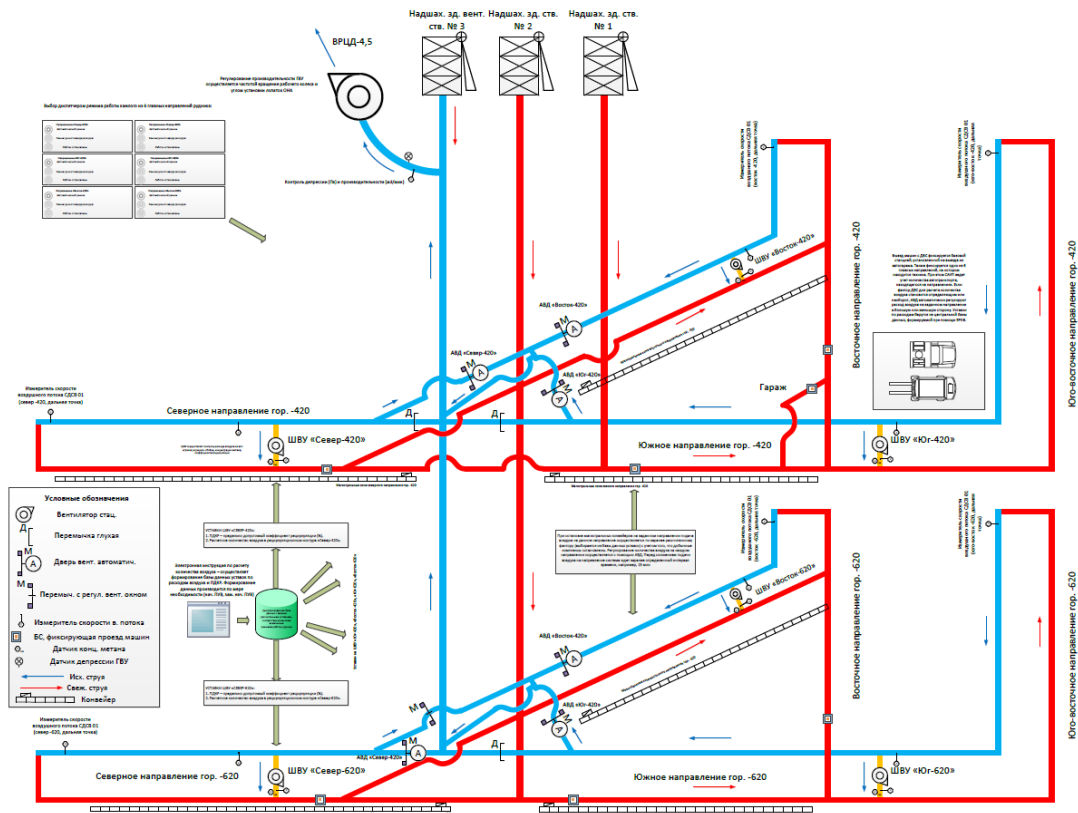


Рисунок 5.17 — Мнемосхема рудника ЗРУ и места расположения рециркуляционных установок



Рисунок 5.18 — Рециркуляционная система ОАО «Беларуськалий»

Максимальная производительность рециркуляционной установки также ограничивается техническими возможностями вентилятора, но при этом допускается повторно использовать весь воздух, кроме части воздуха, необходимого для проветривания потребителей по газовому фактору.

Расчетная производительность ГВУ без учета рециркуляции составляет 29444 м<sup>3</sup>/мин, а с использованием рециркуляционных систем 24033 м<sup>3</sup>/мин, при этом потребляемая мощность ГВУ составляет 2236 кВт и 1825 кВт соответственно с учетом того, что в одновременной работе находятся только три рециркуляционные установки. Тепловая мощность систем воздухоподготовки составляет 3,3 МВт без рециркуляции и 2,7 МВт с рециркуляцией. Снижение энергозатрат на проветривание и воздухоподготовку приведено графически на рисунке 5.19.



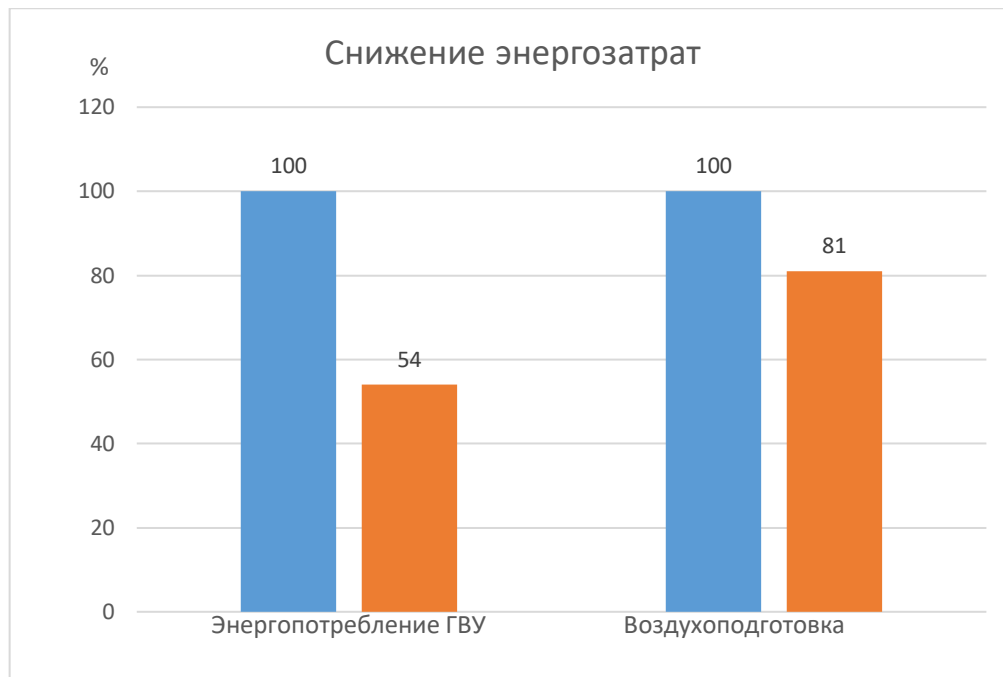


Рисунок 5.19 — Энергозатраты на проветривание и воздухоподготовку до и после внедрения рециркуляционных систем

Суммарное снижение энергопотребления рассчитывается по формуле 5.6 и составляет:

$$\begin{aligned} \Delta A &= \frac{8760 \cdot 9,81 \cdot 0,00196 \cdot (491^3 - 401^3)}{1000 \cdot 0,78} \\ &+ \frac{3600(630 - 515) \cdot 1004 \cdot (2 - (-3,2))}{1000} \\ &= 13\,798\,365, \text{ кВтч в год} \end{aligned}$$

На примере только двух рудников видна экономическая эффективность внедрения рециркуляционного проветривания без угрозы безопасности ведению горных работ. Помимо значительного экономического эффекта внедрение рециркуляционных систем позволяет улучшить качество вентиляции труднопроветриваемых зон, а также способствует улучшению микроклиматических условий и снижению количества выпадающей влаги в теплый период года.

## 5.5. Выводы

В результате проведенных исследований по разработке методических основ расчета и применения систем рециркуляционного проветривания можно сделать следующие выводы:

- выполнено обоснование условий безопасности применения рециркуляционных систем, соблюдение которых позволяет исключить риск возникновения

- аварийных ситуаций, связанных с применением частичного повторного использования воздуха;
- создана универсальная методика разработки схемы рециркуляционного проветривания, позволяющая определять параметры рециркуляционных систем на рудниках любого типа;
  - разработаны технические требования к рециркуляционным установкам, соблюдение которых позволяет безопасно эксплуатировать системы частичного повторного использования воздуха на рудниках любого типа;
  - практическое применение рециркуляционных установок в системах проветривания рудников показало их энергетическую эффективность и промышленную безопасность при условии соблюдения разработанных методических основ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором исследований разработаны схемы организации и методики расчета систем частичного повторного использования воздуха на основе рециркуляционного проветривания. Совокупность результатов диссертационной работы можно квалифицировать как решение научной проблемы по повышению эффективности и обеспечению безопасных условий проветривания рудников за счет внедрения систем частичного повторного использования воздуха.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Исследованы схемы проветривания рудников различных типов и разработаны способы организации рециркуляционного проветривания для каждой группы рудников с учетом топологических особенностей сети горных выработок.
2. Проведены экспериментальные исследования аэродинамических параметров вентиляционных сетей и газового состава рудничного воздуха на рудниках ПАО «Уралкалий» и ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», позволяющие сделать вывод о пригодности воздуха исходящей струи для его повторного использования на рудниках любого типа.
3. На основании натурных исследований внутренних утечек воздуха и аэродинамических параметров систем вентиляции шахт и рудников разработана методика расчета требуемого количества воздуха с учетом применения рециркуляции, учитывающая факторы проветривания рабочих зон, величину утечек воздуха внутри рециркуляционного контура и концентрацию газа на свежей струе, возникающую при наличии рециркуляционных контуров.
4. Разработана конвективно-диффузионная модель расчета газораспределения в сети горных выработок, учитывающая продольную дисперсию и позволяющая выполнять расчет газораспределения в выработках с малыми скоростями движения воздуха, учитывать конфигурацию выработок и соотношение скоростей движения воздуха в смежных выработках.
5. Разработаны мероприятия и технические требования к рециркуляционным установкам, позволяющие обеспечивать безопасность проветривания.
6. Разработана методика выбора оптимальных параметров рециркуляционных систем в зависимости от аэродинамических параметров вентиляционной сети по критерию минимальной потребляемой мощности и методика определения мест

размещения рециркуляционных установок, учитывающая сопротивления выработок по маршруту движения воздуха.

7. Разработана универсальная схема расчета рециркуляционных систем, определяющая основные этапы разработки и внедрения рециркуляционных систем, применимая на рудниках любого типа.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святный В.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии. — Киев: Наукова думка, 1981. — 284 с.
2. Айруни А.Т., Скобунов В.В. О теории воздухораспределения в подземных транспортных сетях с потоком примеси // Проблемы рудничной аэрологии и применение электрической энергии в воспламеняющихся средах. М., 1974. — с. 43-80.
3. Венгеров И. Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы. — Донецк: Норд-пресс, 2008. — 632 с.
4. Воеводин А. Ф., Гончарова О. Н. Метод расщепления по физическим процессам для расчета задач конвекции // Мат. моделирование. — 2001. — Т. 13. — № 5. — С. 90-96.
5. Воронин В.Н. Основы рудничной аэрогазодинамики. — М.-Л.: Углетехиздат, 1951. — 491 с.
6. Воронов Е.Т., Воронов Д.Е., Бондарь И.А. Рециркуляционное проветривание горных выработок для рудников Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2007. — Т. 17. — №. 1. — С. 163-171.
7. Гарбарук А. В., Лапин Ю. В., Стрелец М. Х. Простая алгебраическая модель турбулентности для расчета турбулентного пограничного слоя с положительным градиентом давления // Теплофизика высоких температур. — 1999. — Т. 37. — № 1. — С. 87-91.
8. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом. ПБ 03-553-03. — М.: НТЦ по БП Госгортехнадзора России, 2003.
9. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дис. ... д-ра техн. наук. — Пермь, 2019. — 250 с.
10. Зайцев, А. В. Осушение горных выработок калийных рудников с использованием средств систем автоматического управления проветриванием / А. В. Зайцев, К. М. Агеева // Недропользование. — 2022. — Т. 22. — № 1. — С. 45-50.
11. Зайцев А. В. Исследование параметров рециркуляционного проветривания рабочих зон с учетом различных факторов расчета количества воздуха / А. В. Зайцев, Н. А. Трушкова // Горное эхо. — 2023. — №. 2. — С. 82-89.
12. Зайцев А. В. Исследование рециркуляционного проветривания при наличии источника газовой выделении в рабочей зоне и внутренних утечек воздуха / А.В. Зайцев, Н.А.

- Трушкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — №. 3. — С. 34-46.
13. Инструкция по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудников Старобинского месторождений калийных солей. — Минск – Солигорск – Пермь, 2018.
  14. Казаков Б.П. Ресурсосберегающие технологии управления климатическими параметрами рудников: дис. ... д-ра техн. наук. — Пермь, 2001. — 313 с.
  15. Казаков Б. П., Гришин Е. Л., Трушкова Н. А. Исследование устойчивости совместной работы подземных вентиляторов в калийном руднике при применении рециркуляции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2021. — №. 2. — С. 108-119.
  16. Казаков Б.П. Повышение эффективности ресурсосберегающих систем вентиляции для подземных рудников / Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Шалимов А.В. // Горный журнал. 2014. – №5. – С. 26-28.
  17. Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Шалимов А.В. Проветривание калийных рудников с частичным повторным использованием воздуха // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2007. — № 4. — С. 47-52.
  18. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Особенности моделирования процесса эжектирования воздуха на базе законов сохранения энергии и количества движения выработок // Изв. вузов. Горн. Журн. — 2006. — № 2. — С. 68-72.
  19. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Киряков А.С. К вопросу энергосбережения проветривания рудников // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 139-147.
  20. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Трушкова Н.А. К оценке аварийных ситуаций при проектировании рециркуляционных систем // ФТПРПИ. — 2014. — № 1. — С. 132–137.
  21. Калабин Г. В., Алехичев С. П., Вассерман А. Д. Оценка эффективности вентиляционных систем // Физика процессов, технология и техника разработки недр. — 1970. — С. 224-234.
  22. Клебанов Ф.С. Аэродинамическое управление газовых режимом в шахтных вентиляционных сетях. М.: Наука. — 1974.
  23. Клюквин Г.И. Исследование и разработка метода расчета расхода воздуха в рудниках в условиях интенсивного выноса вредных газов от взрывных работ: Автореф. дис. ... канд. техн.наук. М.: МГИ. – 1981.

24. Кобылкин С. С. Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт: дис. ... д-ра техн. наук. — М.: НИТУ “МИСиС”, 2018. — 322 с.
25. Кобылкин С. С., Кобылкин А. С. Трехмерное моделирование при проведении инженерных расчетов по тактике горноспасательных работ // Горн. журн. — 2018. — № 5. — С. 82–85.
26. Кормщиков Д.С. Исследование и разработка систем аэрогазодинамической безопасности подземных рудников: дис. ... канд. техн. наук. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. — 121 с.
27. Красноштейн А.Е. Научные основы процессов формирования и нормализации аэрозольного и газового состава атмосферы калийных рудников: дис. ... д-ра техн. наук. — ЛГИ, 1977. — 313 с.
28. Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З. Метод расчета стационарного распределения концентрации газообразных примесей в вентиляционной сети произвольной сложности // Вентиляция шахт и рудников. — Ленинград, 1980, вып. 7. — с. 26-32.
29. Красноштейн А. Е., Файнбург Г. З. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников. — Свердловск: УрО РАН, 1992 — 242 с.
30. Красноштейн А. Е., Казаков Б. П., Шалимов А. В. Моделирование нестационарных процессов распространения газовых примесей по выработкам в условиях рециркуляционного проветривания // ФТПРПИ. — 2006. — № 1. — С. 95-101.
31. Кремлев Н.Д. Метод расчета конвективно-диффузионного массопереноса вредных примесей в вентиляционных сетях. — Известия ВУЗов. Горный журнал, 1978, № 6. — с. 74-76.
32. Круглов Ю. В. Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: дисс... д-ра техн. наук. — Пермь, 2012. — 341 с.
33. Кузнецов Г.И. Разработка методов расчета общешахтного расхода воздуха по газам от взрывных работ в условиях интенсивного выноса в системе параллельных соединений выработок: Автореф. дис.... канд. техн. наук. М.: МГИ, 1982.
34. Лайгна К.Ю. Математическое моделирование диффузионных процессов вентиляции штреко- и камерообразных выработок, т. 1. — Таллин: Изд-во ВЦ НИИС ГОССТРОЯ ЭССР, 1979. — 231 с.
35. Левин Л. Ю., Семин М. А. Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 120-130.

36. Левин, Л. Ю. Исследование газовой обстановки в тупиковой выработке при наличии рециркуляционных потоков / Л. Ю. Левин, А. В. Зайцев, Л. Л. Новоселицкая // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – Т. 11. – № 3. – С. 124-128.
37. Левин, Л. Ю. Опасна ли рециркуляция при работе вентилятора местного проветривания? / Л. Ю. Левин, Е. Л. Гришин, Д. С. Кормщиков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 4. – С. 310-317.
38. Мальцев С. В., Казаков Б. П., Семин М. А. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции // Изв. ТГУ. Науки о земле. — 2019. — № 4. — С. 283-291.
39. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников. — Свердловск: Уро АН СССР, 1990. — 251 с.
40. Мохирев Н.Н. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация / Н. Н. Мохирев, В. В. Радько. — М.: Недра—Бизнесцентр. — 2007. — 327 с.
41. Мясников А.А., Павлов А.Ф., Бонецкий В.А. Повышение эффективности и безопасности горных работ. М.: Недра, 1979.
42. Накаряков Е.В. Анализ закономерностей накопления и выноса выхлопных газов от машин с двигателями внутреннего сгорания в тупиковых камерообразных горных выработках / Е. В. Накаряков, М. А. Семин, Е. Л. Гришин, Е. В. Колесов // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 5. — С. 41-47.
43. Николаев А. В. и др. Обеспечение безопасности и энергоэффективности при проветривании шахт и рудников, использующих систему рециркуляции воздуха // Недропользование. — 2017. — Т. 16. — №. 4. — С. 370-377.
44. Ольховский Д.В. Исследование динамики газовой обстановки подземных выработок после проведения взрывных работ / Д.В. Ольховский, О.С. Паршаков, С.А. Бублик // Горные науки и технологии. — 2023. — Т. 8, № 1. — С.47-58.
45. Павлов С. А. К вопросу снижения потребляемой мощности вентилятора главного проветривания за счет применения системы рециркуляции воздуха в рудниках // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2019. — Т. 2. — №. 4. — С. 220-228.
46. Павлов С. А. Применение частичной рециркуляции воздуха для снижения энергозатрат на проветривание рудника // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 212–217.



47. Паршаков О. С., Зайцев А. В., Нестеров Е. А., Андрейко С. С. Комплексное исследование газовой обстановки рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 2. — С. 5-29.
48. Правила промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь. — Солигорск, 2014.
49. Протасеня И.В., Береснев С.П., Круглов Ю.В., Гришин Е.Л., Киряков А.С. Единая информационно-аналитическая система «АэроСеть» для проектирования и расчета вентиляции калийных рудников // Горн. журн. — 2010. — № 8. — С. 69-72.
50. Самарский А. А., Гулин А. В. Устойчивость разностных схем. — М.: УРСС, 2005. — 383 с.
51. Св-во о гос. регистрации № 2015610589. Аналитический комплекс “АэроСеть”: программа для ЭВМ / А. В. Зайцев, Б. П. Казаков, А. В. Кашников, Д. С. Кормщиков, Ю. В. Круглов, Л. Ю. Левин, П. С. Мальков, А. В. Шалимов. Заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН № 2014613790; заявл. 24.04.2014 г.; зарегистрировано 14.01.2015 г. // Оpubл. в БИ. — 2015.
52. Семин М. А., Исаевич А. Г., Жихарев С. Я. Исследование оседания пыли калийной соли в горной выработке // ФТПРПИ. — 2021. — № 2. — С. 178-191.
53. Семин М. А., Исаевич А.Г., Трушкова Н.А., Бублик С.А., Казаков Б.П. К вопросу о расчете распространения вредных примесей в системах горных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — №. 2. — С. 82-93.
54. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. – М.: Углетехиздат, 1949. — 443 с.
55. Технологический регламент по организации проветривания рудников ОАО «Уралкалий», Пермь-Березники-Соликамск-2016.
56. Трушкова Н.А., Бублик С.А. Расчет распространения газовых примесей в горных выработках на основе модели конвективно-диффузионного переноса // Горное эхо. — 2021. — №. 3. — С. 110-117.
57. Трушкова Н.А. Исследование аэродинамических параметров рудничных вентиляционных сетей для определения параметров рециркуляционного проветривания // Горное эхо. — 2020. — №. 4. — С. 102-106.
58. Трушкова Н.А. Исследование газового состава воздуха для оценки возможности применения рециркуляционного проветривания // Горное эхо. — 2019. — Т.76. — №3. — С. 84-87.

59. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И. Аэрология горных предприятий. — М.: Недра, 1987. — 421 с.
60. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт. — М.: Издательство Московского государственного горного университета. — 2004. — 481 с.
61. Ушаков К. З. Об одной предельной задаче теории рециркуляции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2005. — Т. 12. — №. 1. — С. 30-43.
62. Файнбург Г.З. Новый подход к проблеме обеспечения допустимых условий труда горнорабочих средствами вентиляции // XXI век. Техносферная безопасность. — 2023. — Т. 8. — № 4. — С. 381–392.
63. Файнбург Г.З. Проблемы становления новой парадигмы проветривания системы горных выработок рудных шахт // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2024. — Вып. 1. — С. 450-465.
64. Файнбург Г. З. Цифровизация процессов проветривания калийных рудников: монография / Г.З. Файнбург. — Пермь — Екатеринбург, 2020. — 422 с.
65. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. приказом Ростехнадзора от 11.12.2013 № 599, изм. приказом Ростехнадзора от 21.11.2018 №580, 2014. — 122 с.
66. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. Приказом Ростехнадзора от 8.12.2020 № 505, 2020. — 523 с.
67. Чабан П.Д. Совершенствование комбинированных схем проветривания шахт, разрабатывающих многолетнемерзлые россыпи. — Колыма, 1986. — № 6. — с. 4-7.
68. Цой С. Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. Алма-Ата: Наука, 1975.
69. Шалимов А. В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дис. ... д-ра техн. наук. — Пермь, 2012. — 329 с.
70. Штрасбургер К. Определение концентраций вредностей в подземных выработках при работе автотранспорта // Записки Ленинградского горного института — Ленинград, 1968. — т. 55, выпуск 1 — с. 42-46.
71. Ярембаш И.Ф. Очистка рудничной атмосферы после взрывных работ. — М.: Недра, 1974. — 375 с.

72. Ярембаш И.Ф., Бахтин В.В., Данилевич С.М. Исследование динамики рассеивания ядовитых газов при взрывных работах в подготовительных выработках. – В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых, вып. 30 / Респ. межвед. научно-техн. сборник. — Киев: Техника, 1972. — с. 54-58.
73. Andrew O.E. Ventilation of Lake Shore mines // Mining in Canada. Northern Mines Press LTD. — 1957. — 38 p.
74. Arpa G., Sasaki K., Sugai Y. Narrow vein shrinkage stope ventilation measurement using tracer gas and numerical simulation // 12th US/North American Mine Ventilation Symposium. — Reno, 2008. — pp. 261-266.
75. Birchall J. British start to recirculate air underground // Coal Age;(United States). — 1987. — vol. 92., №. 6.
76. Brake D.J. Mine Ventilation: A Practitioner's Manual. — Mine Ventilation Australia. Brisbane, 2012.
77. Bluhm S., Funnel R., L. de Oliveira. Controlled recirculation and refrigeration at Vale's Taquari potash mine // The Australian mine ventilation conference. — Adelaide, SA. — July, 2013. — pp. 237-248.
78. Bluhm S., Biffi M. Variations in ultra-deep, narrow reef stoping configurations and the effects on cooling and ventilation // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. — 2001. — №. 3. — pp. 127-134.
79. Burton R.C., Plenderleith W., Stewart J.M., Pretorius B.C., Holding W. Recirculation of air in the ventilation and cooling of deep gold mines // Mine ventilation: 3-d Int. Congress, Harrogate, England. — 1984. — pp. 291-299.
80. Chang, P., Xu, G., Zhou, F., Mullins, B., Abishek, S., Chalmers, D., Minimizing DPM pollution in an underground mine by optimizing auxiliary ventilation systems using CFD. Tunnelling and Underground Space Technology. — 2019. — Vol. 87. — pp. 112-121.
81. De Souza E. Improving the energy efficiency of mine fan assemblages // Applied Thermal Engineering. — 2015. — pp. 1092–1097.
82. Duan, J., Zhou, G., Yang, Y., Jing, B., Hu, S., CFD numerical simulation on diffusion and distribution of diesel exhaust particulates in coal mine heading face. Advanced Powder Technology. — 2021 — vol. 32. — pp. 3660-3671.
83. Dziurzyński W. and Krawczyk J. Unsteady flow of gases in a mine ventilation network—a numerical simulation // Archives Min. Sci. — 2001. — Vol. 46, No. 2. — pp. 119-137.
84. Feroze, T., A CFD model to evaluate variables of the line brattice ventilation system in an empty heading. J. South. Afr. Inst. Min. Metall. — 2017 — Vol. 117. — pp. 97-108.

85. Flores V., Arauzo L., Jara J., Raymundo C. Optimized ventilation model to improve operations in polymetallic mines in Peru // Brazilian Technology Symposium. — Cham: Springer International Publishing. — 2018. — pp. 515-522.
86. Hall A.E., McHaina D.M., Hardcastle S. Controlled recirculation in Canadian underground potash mines. Mining Science and Technology. — 1990. — Vol. 10, No. 3. — pp. 305-314.
87. Hardcastle S. G., Kolada R. J., Stokes A. W. Studies into the wider application of controlled recirculation in Mine Ventilation // Min. Eng. (London, United Kingdom). — 1984. — №. 273.
88. Hart J., Guymer I., Jones A., and Stovin V. Longitudinal dispersion coefficients within turbulent and transitional pipe flow // Experimental and Computational Solutions of Hydraulic Problems, Springer, Berlin, Heidelberg. — 2013. — pp. 133-145.
89. Kai W., Aitao Z., and Shan L. Computer simulation of dynamic influence of outburst gas flow on mine ventilation network // Disaster Advances. — 2013. — Vol. 19. — pp. 31-38.
90. Laigna K. Y. and Potter É. A. Methods for determining the coefficients of turbulent diffusion in mine ventilation streams // Sov. Min. — 1983. — Vol. 19, No. 3. — pp. 230-235.
91. Lawton B.R. Local cooling underground by recirculation // Transaction of the Inst. of Mining engineers. — 1993. — Vol. 90, May. — pp. 63-68.
92. Lowndes I.S. Computer simulation of multi-district recirculation transients // Mining Science and Technology. — 1988. — Vol. 6., No. 2. — pp. 153-162.
93. McPherson M.J. Subsurface ventilation and Environmental Engineering, 1993.
94. McPherson M.J. Subsurface ventilation engineering, 2007.
95. McPherson M.J. Subsurface ventilation engineering, Mine Ventilation Services // Inc.Fresno, California. 2009.
96. Meyer C. F. Controlled recirculation of mine air in a South African colliery // the 6 th US Mine Ventilation Symposium, Salt Lake City, UT, USA. — 1993. — pp. 25-29.
97. Middleton J.N., Burton R.C., Walker K. Monitoring and control in the recirculation of underground ventilation air // IFAC Automation for mineral resources development quennsland. — Australia. — 1985. — pp. 95-102.
98. Rao G. V. K., Rao B. S., Kumar G. V. Controlled recirculation of mine air-a technique for the future // Journal of Mines, Metals and Fuels;(India). — 1989. — Vol. 37, No. 4.

99. Robinson R., Harrison T. Controlled recirculation of air at Wearmouth Colliery British coal corporation // *Journal of the Mine ventilation society of South Africa*. — 1988. — No. 6. — pp. 78-87.
100. Robinson R., Harrison T. Controlled recirculation of the air at Wearmouth Colliery // *Mining eng.* — 1987. — Vol. 146, 308. — pp. 661-671.
101. Pritchard C., Scott D., Frey G., Case study of controlled recirculation at a Wyoming trona mine // *Trans Soc Min Metall Explor Inc.* — 2013. — Vol. 334, No. 1. — pp. 444-448.
102. Ramsden R. Sheer T. J., Butterworth M. D. Design and simulation of ultra-deep mine cooling systems // *Proceedings of the 7th international mine ventilation congress*. — 2001. — pp. 755-760.
103. Saindon Jean-Paul. Controlled recirculation of exhaust ventilation in Canadian mines: A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science. — The University of British Columbia, 1987. — 171 p.
104. Shriwas M., Calizaya F. Automation in detection of recirculation in a booster fan ventilation network // *International Journal of Mining Science and Technology*. — 2018. — No. 3. — pp. 513-517.
105. Stachulak S. Josef. Controlled air recirculation. Consideration for Canadian hard rock mining: A Thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy // McGill University, Montreal. — 1992. — Vol. 1. — 326 p.
106. Taylor G. I. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe // *Proc. of the Royal Society of London, Series A, Mathem. Phys. Sci.* — 1954 — Vol. 223, No. 1155. — pp. 446-468.
107. Van den Berg L., Manns K., Bluhm S. Controlled Primary Ventilation Recirculation and Re-use with Reconditioning — A Strategy for Deep Mines // *Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress*. — Springer Singapore — 2019. — pp. 27-41.
108. Vardy A. E. and Brown J. M. B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows // *J. Sound Vibration*. — 2003. — Vol. 259, No. 5. — pp. 1011-1036.
109. Wallace K., Prosser B., and Stinnette J. D. The practice of mine ventilation engineering // *Int. J. Min. Sci. Technol.* — 2015. — Vol. 25, No. 2. — pp. 165-169.
110. Widiatmojo A., Sasaki K., Widodo N. P., Sugai Y., Sinaga J., and Yusuf H. Numerical simulation to evaluate gas diffusion of turbulent flow in mine ventilation system // *Int. J. Min. Sci. Technol.* — 2013. — Vol. 23, No. 3. — pp. 349-355.

111. Witek M. L., Teixeira J., and Flatau P. J. On stable and explicit numerical methods for the advection-diffusion equation // *Mathem. Comp. Simulation.* — 2008. — Vol. 79, No. 3. — pp. 561-570.
112. Wu H. W., Gillies A. D. S., Nixon A. C., Trial of controlled partial recirculation of ventilation air at Mount Isa Mines // *Mining Technology.* — 2001. — Vol. 110, No. 2 — pp. 86-96.
113. Zhou A. and Wang K. A transient model for airflow stabilization induced by gas accumulations in a mine ventilation network // *J. Loss Prevention Process Industries.* — 2017. — Vol. 47. — pp. 104-109.
114. Zhou A., Wang K. Role of gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation // *J. Min. Sci.* — 2018. — Vol. 54, No. 1. — pp. 111-119.
115. Zhou, A., Wang, K., Wang, J., & Feng, T. The role of methane buoyancy on the stability of airway airflow in underground coal mine ventilation // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* — 2018. — Vol. 54. — pp. 346-351.
116. Zhou A., Wang K., Wu L., Xiao Y. Influence of gas ventilation pressure on the stability of airways airflow // *Int. J. Min. Sci. Technol.* — 2018. — Vol. 28, No. 2. — pp. 297-301.