

«Горный институт Уральского отделения Российской академии наук»  
филиал  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения  
Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет»

На правах рукописи



**Мальцев Станислав Владимирович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ  
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ**

Специальность 25.00.20

Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
профессор, доктор технических наук  
**Казаков Борис Петрович**

Пермь 2019

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1 Эффективное проветривание рудников со сложными системами вентиляции.....	13
1.2 Способы определения аэродинамических сопротивлений горных выработок рудников.....	15
1.2.1 Использование проектных и справочных данных.....	16
1.2.2 Проведение экспериментальных исследований.....	17
1.2.3 Анализ данных, полученных по результатам применения справочных и экспериментальных коэффициентов аэродинамического сопротивления.....	20
1.3 Регулирование воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях для повышения эффективности проветривания рудников.....	22
1.3.1 Индивидуальные методы регулирования воздухораспределения.....	23
1.3.2 Совместное регулирование воздухораспределения.....	24
1.3.3 Особенности регулирования воздухораспределения в условиях рудников со сложными системами вентиляции.....	26
1.4 Цель и задачи исследования.....	27
2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА РАЗРАБОТКИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ РУДНИКОВ.....	28
2.1 Разработка автоматизированного способа обработки данных воздушно-депресссионных съемок рудников для создания корректной математической модели.....	29
2.1.1 Автоматическое увязывание расходов воздуха в рудничной вентиляционной сети.....	31
2.1.2 Автоматическое увязывание давлений в рудничной вентиляционной сети.....	32
2.1.3 Расчет аэродинамических сопротивлений горных выработок на основании увязанных давлений, увязанных расходов воздуха и параметров источников тяги.....	35
2.2 Программная реализация алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки в аналитическом комплексе «АэроСеть».....	37
2.3 Верификация алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки рудников в аналитическом комплексе «АэроСеть».....	41

2.4	Выводы по главе .....	52
3.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ .....	54
3.1	Определение замерных участков шахтных стволов и мест замера.....	55
3.1.1	Определение границ замерных участков шахтных стволов по результатам численного моделирования .....	55
3.1.2	Определение количества замеров в пределах границ участка ствола ..	78
3.1.3	Факторы, влияющие на определение аэродинамического сопротивления шахтных стволов .....	83
3.2	Методика определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов.....	88
3.2.1	Планирование эксперимента.....	88
3.2.2	Подготовка к проведению экспериментальных исследований .....	88
3.2.3	Методика выполнения замеров и обработки требуемых параметров воздуха.....	91
3.2.4	Верификация методики экспериментального определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов .....	93
3.3	Расчет аэродинамического сопротивления шахтных стволов по данным экспериментальных исследований .....	96
3.4	Выводы по главе .....	98
4.	РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ПРОВЕТРИВАНИИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ РУДНИКОВ СО СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ ВЕНТИЛЯЦИИ.....	100
4.1	Постановка задачи оптимизации параметров вентиляционных сооружений и режимов работы двух и более ГВУ по критерию минимизации потребляемой мощности.....	100
4.1.1	Анализ зон влияния ГВУ и вентиляционных сооружений на проветривание участков рудничной вентиляционной сети.....	103
4.1.2	Определение оптимальных режимов работы ГВУ, обеспечивающих нормативные расходы воздуха при минимальных затратах энергии .....	105
4.1.3	Оптимизация воздухораспределения в рудничной сети на основе регулирования воздушных потоков вентиляционными сооружениями .....	110
4.1.4	Минимизация потребляемой мощности ГВУ в системе отрицательного регулирования.....	113
4.2	Разработка алгоритма подбора режимов работы каждой ГВУ и параметров вентиляционных сооружений по минимальной потребляемой мощности.....	114
4.3	Выводы по главе .....	120

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ПРОВЕТРИВАНИЯ РУДНИКОВ СО СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ ВЕНТИЛЯЦИИ .....	121
5.1 Методика построения математической модели расчетной вентиляционной сети рудников в аналитическом комплексе «АэроСеть» .....	122
5.1.1 Построение модели вентиляционной сети по проектным данным.....	122
5.1.2 Проведение воздушно-депресссионной съемки рудника .....	123
5.1.3 Автоматизированная обработка данных воздушно-депресссионной съемки.....	124
5.1.4 Определение аэродинамических сопротивлений горных выработок.	125
5.1.5 Пополнение модели параметрами источников тяги и ее верификация	126
5.2 Разработка модуля оптимизации параметров сложных систем рудничной вентиляции в АК «АэроСеть» по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности .....	127
5.3 Повышение энергоэффективности сложных систем вентиляции рудников на основе автоматизированного проектирования проветривания .....	130
5.4 Выводы по главе .....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	136
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	138

## Введение

### Актуальность темы диссертации

В настоящее время в связи с исчерпанием легкодоступных запасов полезных ископаемых, находившихся в благоприятных горно-геологических условиях, у производителей появляется необходимость расширения площадей обрабатываемых участков месторождений и переход на глубокозалегающие горизонты для поддержания или увеличения производственных мощностей. С увеличением площадей обрабатываемых участков и глубины ведения горных работ возрастает протяженность сетей горных выработок, рабочие зоны перемещаются на границы шахтного поля. Вследствие этого усложняются схемы проветривания рудников. Возникает потребность в увеличении требуемого количества воздуха, подаваемого в рудник, доведении его до границ шахтного поля. При этом необходимо помнить и об экономии электроэнергии. Удаление фронта ведения горных работ и увеличение требуемого количества рудничного воздуха обычно приводят к необходимости замены главных вентиляторных установок (ГВУ). В случаях, когда одна ГВУ не в состоянии обеспечить все рабочие зоны требуемым количеством воздуха, необходимо использовать несколько главных вентиляторных установок. Например, требуемое количество воздуха для проветривания рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» составляет 78300 м<sup>3</sup>/мин, рудник проветривается четырьмя главными вентиляторными установками типа ВЦД-47 «Север». Для проветривания рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий» необходимо 27585 м<sup>3</sup>/мин. Проветривание рудника осуществляется пятью главными вентиляторными установками.

В условиях таких рудников задача обеспечения рабочих зон требуемым количеством воздуха и выбора энергоэффективного режима проветривания сводится к определению степени влияния каждой главной вентиляторной установки на отдельные участки вентиляционной сети, а также к выбору мест установки и определению параметров вентиляционных сооружений. Использование большого количества вентиляционных сооружений, в свою

очередь, приводит к увеличению аэродинамического сопротивления вентиляционной сети. Это значит, что для поддержания подачи требуемого количества воздуха необходимо увеличивать производительность главных вентиляторных установок, следовательно, повышать потребление электроэнергии.

При проектировании вентиляции таких рудников важно учитывать и взаимное влияние главных вентиляторных установок, и настраивать режимы их работы таким образом, чтобы каждая из них работала максимально эффективно на свой участок вентиляционной сети. При этом необходимо стремиться к минимизации эксплуатационных энергозатрат на проветривание.

В дальнейшем системы вентиляции, которые характеризуется наличием двух и более главных вентиляторных установок, расположенных на разных стволах и имеющих обособленные зоны влияния, будем называть сложными системами вентиляции.

Вопросами регулирования воздухораспределения, проектирования вентиляции и моделирования аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях в России занимались А.А. Скочинский, И.И. Медведев, А.Е. Красноштейн, Ф.А. Абрамов, Л.А. Пучков, Р.Б. Тянь, С.В. Цой, С.М. Цхай, Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, Ю.В. Круглов, С.С. Кобылкин, Г.В. Стась, А.В. Осинцева и другие. Среди зарубежных исследований известны работы M.J. McPherson, H. Cross, Z.A. Yang, C. Allen.

Традиционно задача определения оптимальных аэродинамических параметров ГВУ и вентиляционных сооружений при проектировании вентиляции рудников решалась депрессионным ходом, без учета распределения в сети. Современное программное обеспечение позволяет решать задачу рационального регулирования расходов воздуха в сети по критериям обеспеченности рабочих зон требуемым количеством воздуха и минимизации потребляемой мощности для одной главной вентиляторной установки.

При проветривании рудника двумя и более ГВУ возникает необходимость разграничения зон влияния каждой из них, а также введения критерия

эффективности регулирования параметров источников тяги и вентиляционных сооружений.

Для одновременного регулирования параметров нескольких главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений при проектировании рудников со сложными вентиляционными системами необходимо разработать систему эффективного проветривания по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности с оригинальными методическими средствами управления и программными средствами контроля.

В условиях существования государственной программы Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» разработка системы эффективного проветривания при проектировании рудников со сложными системами вентиляции становится актуальной задачей.

**Целью работы** является повышение эффективности проветривания сложных вентиляционных сетей подземных рудников.

**Основная идея работы** заключается в создании способов, повышающих точность определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем на основе применения методов математического моделирования на этапах обработки экспериментальных данных и решения задач регулирования воздухораспределения в вентиляционных сетях.

#### **Основные задачи работы:**

1. Совершенствование способа разработки математических моделей вентиляционных сетей на основе автоматизации обработки данных воздушно-депресссионной съемки с учетом изменяющегося характера воздухораспределения на рудниках со сложными системами вентиляции.

2. Разработка алгоритмов корректировки замеренных значений расходов и давлений по 1-ому и 2-ому законам Кирхгофа, верификация их на основе данных натурных исследований на рудниках с разветвленными и протяженными сетями горных выработок.

3. Совершенствование метода определения аэродинамических сопротивлений на основе проведения предварительных экспериментальных исследований в шахтных стволах и верификация его на натуральных измерениях.

4. Разработка алгоритма регулирования совместной работы нескольких главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений в вентиляционных сетях рудников по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности.

5. Разработка научно-методических основ и программных средств для повышения энергоэффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции.

**Методы исследований** предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали: анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования по определению аэротермодинамических параметров воздуха и элементов вентиляционных сетей, статистическую обработку результатов экспериментальных измерений, математическое моделирование аэродинамических процессов в рудничной вентиляционной сети, анализ результатов численного моделирования и натуральных экспериментов.

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

1. Автоматизированный способ обработки экспериментальных данных, основанный на корректировке значений расходов воздуха и давлений по 1-ому и 2-ому законам Кирхгофа, позволяет установить достоверные аэродинамические параметры вентиляционных систем рудников с учетом динамики воздушных потоков независимо от сложности вентиляционных сетей.
2. Экспериментально-аналитический метод определения закономерностей течения воздушных потоков в шахтных стволах, учитывающий границы участков проведения замеров, физические процессы в стволах и факторы, влияющие на точность измерений в пределах участка ствола, позволяет

рассчитывать величину аэродинамического сопротивления шахтных стволов произвольного типа.

3. Способ оптимизации режимов совместной работы нескольких источников тяги и вентиляционных сооружений, заключающийся в выявлении и учете зон их аэродинамического влияния, позволяет определять эффективные режимы работы каждого из источников тяги по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности.

#### **Научная новизна:**

1. Разработан способ автоматизированной обработки данных натурных измерений для создания детализированных математических моделей вентиляционных сетей, используемых для повышения точности прогнозирования воздухораспределения.
2. Обоснован экспериментально-аналитический метод расчета аэродинамических сопротивлений шахтных стволов, который позволяет определить положения границ участков проведения измерений и учитывает изменения аэро- и термодинамических параметров воздуха по всей длине исследуемой части ствола.
3. Предложен и реализован алгоритм регулирования совместной работы нескольких источников тяги и вентиляционных сооружений для автоматизированного проектирования энергоэффективных систем проветривания рудников.
4. Разработаны методические основы и программные средства для повышения энергоэффективности проветривания рудников со сложными вентиляционными системами.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается значительным объемом экспериментальных исследований, проведенных в шахтных условиях, и положительными результатами верификации данных, полученных на основании численного моделирования. Результаты моделирования воздухораспределения проверялись в рамках проводимых

натурных исследований (воздушно-депрессивных съемок) на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

**Практическое значение и реализация результатов работы** состоит в использовании разработанных методик создания корректных математических моделей для решения вентиляционных задач и алгоритма оптимизации параметров сложных систем рудничной вентиляции для минимизации их суммарной потребляемой мощности. Предложенные алгоритмы реализованы в составе аналитического комплекса «АэроСеть», используемого при создании математических моделей и дальнейшей разработке технических решений по повышению эффективности проветривания рудников ПАО «Уралкалий», ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель», ОАО «Беларуськалий», АО «Апатит», ООО «ЕвроХим – Усольский калийный комбинат».

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

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научных исследований «ГИ УрО РАН» по темам «Разработка теоретических основ и практических методов интеллектуального мониторинга сложных горнотехнических объектов» (РНФ, № гос. регистрации 19-77-30008), «Исследование влияния фазовых переходов атмосферной влаги на формирование комфортных условий ведения горных работ» (РФФИ, № гос. регистрации 115022410087) и «Разработка методов прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания горнодобывающих предприятий» (РФФИ, № гос. регистрации АААА-А17-117061510015-6), а также с тематикой хоздоговорных работ с горными предприятиями ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель», ОАО «Беларуськалий», АО «Апатит» и проектными институтами ООО «Институт Гипроникель», АО «ВНИИ Галургия».

#### **Апробация работы**

Научные положения и основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийском молодежном форуме «Нефтегазовое и горное дело» (Пермь, ПНИПУ, 2012 г.), на международных

научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, Горный институт НИТУ МИСиС, 2013, 2015, 2016 и 2018 гг.), на международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика: проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного оборудования» (Пермь, ПНИПУ, 2014 и 2015 гг.), на всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Апатиты, Горный институт КНЦ РАН, 2016 гг.), на III-ей и IV-ой международных научно-практических конференциях «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, 2016 и 2018 гг.) а также на ежегодных научных сессиях «ГИ УрО РАН» «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (Пермь, «ГИ УрО РАН», 2013-2018 гг.).

### **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 научных решений и их практическая реализация, сформулированы научные положения и выводы.

Практические эксперименты и внедрение результатов исследований были бы невозможны без содействия ведущих специалистов горных предприятий: заместителя главного инженера по ПВС рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» Пехоты С.Н., главного горняка ООО «ЕвроХим – Усольский калийный комбинат» Окулова Е.А. и других.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.т.н., проф. Казакову Б.П. за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, д.т.н. Левину Л.Ю. за ценные указания, Казаковой Л.В. за консультации и ценные указания, д.т.н. Зайцеву А.В. за помощь в выполнении работы, д.т.н. Шалимову А.В. за ценные указания и к.т.н. Семину М.А. за помощь

в разработке алгоритмов. Успешной работе над диссертацией способствовала творческая, доброжелательная атмосфера в коллективе и поддержка семьи.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликованы 15 печатных работ, в том числе 6 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, получен 1 патент на изобретение.

### **Объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков и 18 таблиц. Список использованных источников состоит из 110 наименований, в том числе 17 зарубежных.

## **1. Состояние вопроса и задачи исследования**

### **1.1 Эффективное проветривание рудников со сложными системами вентиляции**

Эффективное проветривание рудников является важнейшей задачей рудничной аэрологии для обеспечения безопасности труда горнорабочих.

Эффективность проветривания, размер капитальных и эксплуатационных затрат на систему вентиляции определяются в зависимости от следующих факторов:

- обеспеченности рабочих зон расчетным количеством воздуха;
- оптимальных мест расположения минимального количества средств регулирования воздухораспределения в рудничной вентиляционной сети;
- минимальных затрат на потребляемую электроэнергию ГВУ.

Ежегодно топология сетей горных выработок рудников усложняется. А именно: увеличивается протяженность сети горных выработок, углубляется фронт ведения горных работ, возникает множество диагональных связей между горизонтами, а также возрастает количество воздухоподающих и вентиляционных стволов.

Обеспечение требуемым количеством воздуха отдаленных участков разветвленных и протяженных сетей одной ГВУ не всегда осуществимо. В связи с этим возникает необходимость использования для проветривания нескольких главных вентиляторных установок, каждая из которых, в основном, влияет на свой участок вентиляционной сети.

Поэтому для обеспечения эффективного проветривания рудников необходимо на стадии проектирования проводить прогнозные расчеты воздухораспределения [4,5,68,97], а также подбирать оптимальные аэродинамические параметры главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений на всех этапах развития горных работ.

При проектировании вентиляции рудников можно выделить класс рудников со сложными системами вентиляции. Сложная система вентиляции

характеризуется наличием двух и более главных вентиляторных установок, расположенных на разных стволах и имеющих обособленные зоны влияния.

Прогнозирование воздухораспределения рудников со сложными системами вентиляции невозможно без разработки математических моделей [32,54] вентиляционных сетей в специализированных программных комплексах [8,19,34,109,110]. Основными исходными данными для разработки моделей являются аэродинамические сопротивления горных выработок и параметры источников тяги (производительность и напор ГВУ).

Многочисленные работы [3,61,78,96,108], посвященные вопросу определения аэродинамического сопротивления горных выработок, включают в себя методики по проведению экспериментальных исследований.

Существенными недостатками этих методик являются:

- трудоемкость выполняемых работ;
- большие затраты времени на настройку оборудования;
- ограниченная применимость рекомендуемых приборов;
- сложные и трудоемкие способы обработки данных.

Высокая интенсивность ведения горных работ приводит к значительным изменениям аэродинамических параметров рудничной вентиляционной сети, что подтверждается при проведении полевых исследований [41]. Указанные трудности существенно возрастают при исследовании рудников со сложными системами вентиляции.

Например, в условиях рудников ПАО «ГМК «Норильский Никель» проведение воздушно-депресссионных съемок по существующим методикам не позволило точно определить аэродинамические сопротивления подсечных горизонтов из-за активного перемещения крупногабаритной техники, из-за постоянного возникновения новых завалов и затоплений выработок в процессе ведения горных работ. По результатам таких измерений разрабатывается упрощенная математическая модель, состоящая преимущественно из «эквивалентов» горных выработок (в одном эквиваленте — десятки выработок).

Поэтому возникает необходимость совершенствования методов экспериментальных измерений и обработки полученных данных.

Для повышения эффективности проветривания таких рудников необходимо подбирать оптимальные параметры для всех ГВУ и вентиляционных сооружений, а также рационально расставлять их в вентиляционной сети. В связи с постоянным развитием горных работ на разных этапах требуется систематическая корректировка работы системы вентиляции. Это значит, что при проектировании вновь прирезаемых горизонтов или участков горных работ необходимо вновь подбирать параметры средств регулирования воздухораспределения всей сети и менять места их установки.

В связи с увеличением производственных мощностей и протяженности сети горных выработок [70], что является следствием введения в отработку новых горизонтов и горных участков, проблемы эффективного проветривания рудников со сложными системами вентиляции при разработке месторождений полезных ископаемых являются актуальными.

## **1.2 Способы определения аэродинамических сопротивлений горных выработок рудников**

Основными исходными данными для разработки расчетной модели вентиляционной сети являются аэродинамические сопротивления горных выработок, которые делятся на три вида [1,18,77,85]:

- сопротивление трения;
- местные сопротивления;
- лобовые сопротивления.

Основное воздействие на величину сопротивления линейных участков оказывают шероховатость стенок (сопротивление трения), тип крепления, загроможденность горных выработок и наличие в них вспомогательных конструкций (лобовые сопротивления). На сопряжениях линейных участков (повороты, тройники и др.) преобладают местные сопротивления [10,24,83].

Исследователями [46,89] доказано, что основная часть местных сопротивлений рудничной вентиляционной сети приходится на участки сопряжений «канал – ствол» и «ствол — горизонт». С использованием современных вычислительных комплексов (ANSYS, SolidWorks и др.) [74,94,106] разработаны методики по определению местных сопротивлений и решения по их уменьшению (изменение геометрии каналов, угла падения канала и т.д.) на участках вентиляционной сети [39,45,48,49,73].

В связи с малой величиной местных сопротивлений на сопряжениях горных выработок внутри горизонта [27,89] отдельное измерение их не представляется возможным. Поэтому обычно считается, что они входят в состав линейных сопротивлений горных выработок горизонта.

Основные исследования по определению аэродинамических сопротивлений горных выработок проведены А.А. Скочинским, А.И. Ксенофоновой, Н.Н. Мохиревым, В.А. Долинским и другими исследователями [28,51,55,79,92].

Аэродинамические сопротивления ( $R$ ) горных выработок определяются по проектным и справочным данным, а также по данным проведенных экспериментальных исследований. Выбор применяемого способа определения  $R$  зависит от этапа развития работ на руднике. На этапе проектирования используются проектные и справочные данные, в период эксплуатации проводятся экспериментальные исследования в рудничной вентиляционной сети.

### **1.2.1 Использование проектных и справочных данных**

На этапе проектирования вентиляции рудников определяются геометрические и аэродинамические параметры вертикальных, горизонтальных и наклонных горных выработок.

Для расчета аэродинамических сопротивлений горных выработок по проектным данным используются геометрические параметры горных выработок  $L_i$  (м) и  $S_i$  (м<sup>2</sup>) и коэффициент аэродинамического сопротивления  $\alpha_i$  (Н·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>):

$$R_i = R(L_i, S_i, \alpha_i). \quad (1.1)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления горных выработок включает в себя все виды сопротивлений, представленных в конкретной выработке:

$$\alpha_i = \alpha_{тр.i} + \alpha_{м.i} + \alpha_{л.i}, \quad (1.2)$$

где  $\alpha_{тр.i}$  – коэффициент, учитывающий сопротивление трения воздуха о поверхность крепи  $i$ -той горной выработки;  $\alpha_{м.i}$  – коэффициент, учитывающий резкое изменение размеров  $i$ -той горной выработки, резкие повороты и др.;  $\alpha_{л.i}$  – коэффициент, учитывающий сопротивление, оказываемое движущемуся воздуху находящимся в нем телом.

Значение коэффициента  $\alpha_i$  принимается из таблиц справочников [43,62] для требуемой горной выработки или определяется по результатам численного моделирования аэродинамических процессов с учетом геометрических параметров, типа крепления и наличия вспомогательных конструкций в сечении горной выработки.

Имеющиеся многочисленные исследования вопроса определения аэродинамического сопротивления горных выработок [61,78 и др.] показывают, что в процессе эксплуатации рудника сопротивление горных выработок существенно возрастает [67]. Такие изменения связаны со «старением» вентиляционных сетей. Основные причины аэродинамического старения горных выработок описаны в работах [22,50,76]: увеличение шероховатости горных выработок; изменение поперечного сечения, связанное с деформациями горного массива и захламлением почвы горных выработок.

### **1.2.2 Проведение экспериментальных исследований**

Для определения аэродинамических сопротивлений горных выработок рудников экспериментальным способом устанавливаются потери давления [98] в выработке и количество воздуха, проходящего по ней.

$$R_i = \frac{h_i}{Q_i^2}, \quad (1.3)$$

где  $h_i$  – потеря давления на  $i$ -той горной выработке, Па;  $Q_i$  – количество воздуха, протекающее по  $i$ -той выработке.

В условиях разветвленных и протяженных рудников определение аэродинамических сопротивлений горизонтальных и наклонных выработок экспериментальным способом вызывает затруднения. Основные сложности проведения подробных замеров на таких рудниках связаны с интенсивным движением техники, а также с большой протяженностью сети горных выработок.

В связи с большой протяженностью сети горных выработок и нестационарностью рудничной вентиляционной сети проведение подробных измерений аэродинамических параметров является трудоемким и нерациональным занятием.

Для разработки корректной математической модели необходимо определить аэродинамические сопротивления всех горных выработок вентиляционной сети. Поэтому основной задачей для создания корректной модели является разработка инструмента для расчета аэродинамических сопротивлений на основании минимально требуемого количества замеренных значений давлений и расходов воздуха [47].

В связи с тем, что значительная часть давления ( $\sim 70\%$ ) теряется на шахтных стволах [37], задача точного определения их аэродинамического сопротивления особенно актуальна.

В период 1950-1951 гг. под руководством Скочинского А.А. проведено фундаментальное исследование по определению аэродинамических сопротивлений шахтных стволов угольных шахт Донбасса. Существенный вклад внесен Ксенофоновой А.И. под руководством которой проведена экспериментальная часть исследований.

При проведении экспериментальных исследований аэродинамических сопротивлений шахтных стволов Донбасса исследователи кафедры рудничной вентиляции и техники безопасности Московского горного института выбирали стволы в соответствии со следующими условиями и ограничениями [78]:

- исследуемые стволы должны быть геометрически подобны типовым стволам альбомов чертежей Южгипрошахта;
- шахтный ствол сопряжен с одним горизонтом;
- для проведения замеров на участке ствола с установившимся потоком воздуха и депрессией глубина ствола должна быть более 200 м;
- количество воздуха, движущегося по стволу, не менее 42 м<sup>3</sup>/с;
- в выработках околоствольного двора можно замерить весь воздух, поступающий в шахту по стволу.

На рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей определены сопротивления шахтных стволов Мохиревым Н.Н. [60,61]. Глубина исследуемых стволов составляла 300 – 400 метров, и они сопряжены с одним горизонтом. Стволы Верхнекамского месторождения и стволы Донбасса отличаются креплением и армированием.

По результатам проведенных исследований опубликованы справочные таблицы коэффициентов аэродинамического сопротивления стволов некоторых шахт Донбасса и Верхнекамских калийных рудников и «Методика по определению коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов» [61,78]. Методика имеет ряд недостатков, изложенных в работах [52,53].

Существующие справочные коэффициенты в отечественной литературе [62,78] изменяются в пределах 0,001 – 0,006 кг/м<sup>3</sup>.

Многообразие вариантов крепления и армирования [66,81] шахтных стволов показывает, что стволы являются особенными горными выработками по определению их аэродинамического сопротивления.

В зарубежной литературе [95,101,104,107] приводятся данные по экспериментальному определению аэродинамического сопротивления стволов.

Работы [100,105], выполненные исследователями М.Д. McPherson и J.B. Deen, посвящены снижению аэродинамического сопротивления стволов за счет изменения формы расстрелов.

Зарубежными учеными W.J. Kempson, R.C.Q. Webber-Youngman и J.P. Meuer проведена объемная исследовательская работа по использованию CFD

моделирования для определения аэродинамического сопротивления стволов [102]. В данной работе авторы подчеркивают необходимость проведения предварительных экспериментальных исследований в существующих стволах, на основании которых нужно производить моделирование, а также приводят результаты расчетов проектируемых стволов.

Точность определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов зависит от правильно выбранного участка, на котором необходимо провести замеры.

Проведенный анализ справочной литературы [29,78,89] показал, что начальная точка проведения замера расположена после сопряжения ствола с калориферным каналом через  $8 \div 50$  диаметров ствола от слияния потоков. Такой большой разброс говорит о необходимости индивидуального расчета границ исследуемых участков.

Кроме того, ни в одной из работ по определению коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов не приводятся данные о возможной погрешности определения этих коэффициентов. Так же отсутствует сравнение справочных коэффициентов аэродинамического сопротивления с коэффициентами, полученными по результатам проведения экспериментальных исследований.

Проведенные экспериментальные исследования на шахтных стволах показали, что существующие методы не позволяют точно и быстро определять аэродинамические сопротивления стволов.

### **1.2.3 Анализ данных, полученных по результатам применения справочных и экспериментальных коэффициентов аэродинамического сопротивления**

При сравнении коэффициентов аэродинамического сопротивления из литературных источников [42,43,62 и др.] с коэффициентами, вычисленными по результатам натурных измерений в условиях глубоких шахтных стволов, выявлено их несоответствие. Для определения ошибочных коэффициентов

разработаны две расчетные модели вентиляционной сети. В первой модели использованы справочные коэффициенты, во второй – коэффициенты, полученные по данным натурных замеров.

Использование справочных коэффициентов аэродинамического сопротивления для проектирования вентиляции вновь прирезаемых участков рудников показало, что проветривание рудников существующими высоконапорными вентиляторами главного проветривания невозможно из-за большой потери давления на стволах [53].

Помимо этого, принятие некорректных коэффициентов приводит к «искусственному» завышению значений аэродинамического сопротивления стволов и дальнейшему увеличению капитальных затрат при их проектировании (за счет мероприятий, направленных на снижение аэродинамического сопротивления шахтных стволов, например, увеличение диаметра стволов и др.). Поэтому возникла необходимость уточнения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов.

Полученные результаты показали, что определение аэродинамического сопротивления шахтных стволов экспериментальным путем является более точным способом, чем использование справочных значений. На вновь проектируемых стволах аэродинамические сопротивления необходимо рассчитывать, используя методы CFD-моделирования.

Одними из наиболее сложных шахтных стволов по условиям измерений, глубине и количеству сопряжений являются стволы Норильских рудников. Стволы разнообразны по армированию, креплению, оснащению техническими приспособлениями, геометрическим параметрам. Поэтому появилась потребность разработки методики определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов.

### **1.3 Регулирование воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях для повышения эффективности проветривания рудников**

Интенсивное развитие горных работ приводит к увеличению протяженности сетей горных выработок, и как следствие — к снижению эффективности проветривания.

В условиях рудников со сложными системами вентиляции для повышения эффективности проветривания [9,11,84,90] требуется выбирать оптимальные места для установки ГВУ и средств отрицательного регулирования, подбирать их оптимальные параметры, а также осуществлять их взаимную увязку.

В зависимости от разветвленности и протяженности вентиляционной сети методы регулирования воздухораспределения можно разделить на две большие группы [7,16,40]:

1. Индивидуальные (регулирование отдельно взятым способом в рабочей зоне или внутри участка вентиляционной сети).
2. Совместные (регулирование всеми способами вместе во всей сети).

Индивидуальные методы предназначены для регулирования воздухораспределения внутри участков рудничной вентиляционной сети. Применение индивидуальных методов осуществляется: при подаче в рудник воздуха меньше расчетного значения, при выявленных утечках воздуха в рудничной вентиляционной сети, при неправильном распределении воздуха между горизонтами рудника и при подаче в рабочую зону расхода воздуха меньше расчетного значения.

Совместное регулирование воздухораспределения осуществляется для повышения эффективности проветривания [59] всей вентиляционной сети рудника. Применение данного метода позволяет уменьшить затраты на материалы, оборудование и потребляемую вентиляторными установками электроэнергию.

При этом применение каждого из методов в условиях рудников со сложными системами вентиляции требует предварительной проработки и зависит от конкретных горнотехнических, правовых и материальных условий предприятия.

### **1.3.1 Индивидуальные методы регулирования воздухораспределения**

Индивидуальное регулирование воздухораспределения внутри участков рудничной вентиляционной сети осуществляется путем [13,67,85]:

- изменения режима работы главной вентиляторной установки;
- увеличения аэродинамического сопротивления в горных выработках;
- уменьшения аэродинамического сопротивления в горных выработках.

Оперативное увеличение или уменьшение общешахтного количества воздуха осуществляется за счет изменения режима работы главной вентиляторной установки (изменения частоты вращения рабочего колеса, изменения угла атаки лопаток рабочего колеса вентилятора и изменения угла атаки лопаток направляющего аппарата).

Одним из наиболее распространенных способов регулирования распределения расходов воздуха в вентиляционных сетях является увеличение аэродинамического сопротивления горных выработок. Такой способ называется отрицательным регулированием, так как за счет дополнительно введенного сопротивления увеличиваются энергозатраты всей вентиляционной системы. Регулирование воздухораспределения путем увеличения аэродинамического сопротивления горных выработок достигается установкой в них регуляторов отрицательного типа – вентиляционных дверей, перемычек [67].

Уменьшение аэродинамического сопротивления горных выработок осуществляется путем проведения дополнительной выработки, параллельной выработке с большим сопротивлением; расширения выработок с большим аэродинамическим сопротивлением и установки в них вспомогательных вентиляторов.

В зависимости от сложности топологии вентиляционной сети регулировать воздухораспределение можно применением отдельно взятого метода или применением комплекса методов.

### **1.3.2 Совместное регулирование воздухораспределения**

Совместное регулирование воздухораспределения в горных выработках осуществляется путем использования сочетания всех или некоторых способов регулирования для достижения наименьших капитальных и эксплуатационных затрат. Протяженность рудничной вентиляционной сети возрастает с каждым годом [70], следовательно, требуется постоянное совершенствование методов проведения прогнозных расчетов по определению оптимальных параметров регулирования воздухораспределения.

Решением задачи регулирования воздухораспределения, проектирования вентиляции и моделирования аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников занимались: С.В. Цой, С.М. Цхай, В.Я. Потемкин, Р.Б. Тяп, Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, Ю.В. Круглов, С.С. Кобылкин, Г.В. Стась, А.В. Осинцева и другие.

Задача оптимального распределения воздуха на действующих рудниках появляется при проектировании [20,33,35,68,71] дополнительных выработок и неоднократно решается в течение всего периода ведения горных работ. Перераспределение воздуха производится путем установки новых вентиляционных сооружений и вентиляторных установок. По завершении реконструкции производится корректировка работы главной вентиляторной установки (ГВУ).

Система оптимального управления воздухораспределением, разработанная Ю.В. Кругловым [37,38], позволяет определять оптимальное положение автоматических вентиляционных ворот (АВД) и корректировать режим работы ГВУ для минимизации потребления электроэнергии главным вентилятором. Для снижения депрессии ГВУ и мощности потребления электроэнергии устанавливаются рециркуляционные установки. Данная система активно

применяется на калийных рудниках. Использование рециркуляционных установок позволяет существенно снизить потребление электроэнергии на ГВУ.

Система оптимального управления разработана для повышения энергоэффективности эксплуатируемых рудников за счет рационального перераспределения воздуха между крыльями шахтного поля путем автоматического изменения параметров работы АВД, рециркуляционных установок и ГВУ.

Применение системы оптимального управления требует существенных капитальных и эксплуатационных затрат. В условиях протяженных и разветвленных рудников Норильска данная система труднореализуема ввиду того, что рудники обладают сложной топологией вентиляционной сети с большим количеством горизонтов и стволов, двумя и более поверхностными ГВУ.

В Горном институте КНЦ РАН С.А. Козыревым и А.В. Осинцевой разработана система [30], оптимизирующая размещение регуляторов воздухораспределения в вентиляционных сетях подземных рудников на основе генетического алгоритма. Эта система основывается на предварительно расставленных средствах регулирования и дальнейшем подборе их оптимальных параметров посредством применения генетического алгоритма, путем перебора множества вариантов. При этом в [65] говорится, что генетические алгоритмы не гарантируют того, что полученное решение будет оптимальным. Кроме того, генетические алгоритмы более медлительны в расчете по сравнению с простыми алгоритмами.

Перечисленные исследователи не рассматривали в своих работах рудников со сложными системами вентиляции, которые имеют свою специфику регулирования воздухораспределения. Такие рудники отличаются протяженными и разветвленными сетями горных выработок, а также сложными схемами проветривания.

### **1.3.3 Особенности регулирования воздухораспределения в условиях рудников со сложными системами вентиляции**

При регулировании воздухораспределения в условиях рудников со сложными системами вентиляции необходимо учитывать ряд особенностей:

- Подземная часть имеет большую протяженность и разветвленность, следовательно, возникают проблемы с расстановкой регуляторов.
- Проветривание протяженных и разветвленных рудников осуществляется двумя и более главными вентиляторными установками, следовательно, появляются сложности с подбором оптимальных параметров работы всех ГВУ.

Максимального эффекта при регулировании воздухораспределения рудников сложной топологии можно добиться путем рационального выбора мест установки средств регулирования и определения их минимального количества и оптимальных параметров. Достичь этого в разветвленных и протяженных рудниках можно, используя методы математического моделирования.

Зачастую проветривание разветвленных рудников осуществляется двумя и более вентиляторными установками. Это обусловливается большими объемами ведения горных работ и увеличением расчетного количества воздуха для проветривания рудника. Основной проблемой при использовании нескольких ГВУ является подбор оптимальных параметров с учетом их взаимного влияния друг на друга. Главные вентиляторные установки должны одновременно и с наибольшей эффективностью работать на вентиляционную сеть рудников или шахт.

Совершенствование автоматизированных методов регулирования воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях является перспективным направлением при развитии горных работ.

Для повышения эффективности проветривания необходимо, чтобы регулирование воздухораспределения осуществлялось с наименьшими затратами на материалы, оборудование и электроэнергию. В связи с этим на основе

совершенствования расчетной модели необходимо разработать автоматизированную систему для проведения прогнозных расчетов и оптимизации параметров средств регулирования воздухораспределения.

#### **1.4 Цель и задачи исследования**

Целью настоящей работы является повышение эффективности проветривания сложных вентиляционных сетей подземных рудников.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Совершенствование способа разработки математических моделей вентиляционных сетей на основе автоматизации обработки данных воздушно-депресссионной съемки с учетом изменяющегося характера воздухораспределения на рудниках со сложными системами вентиляции.
2. Разработка алгоритмов корректировки замеренных значений расходов и давлений по 1-ому и 2-ому законам Кирхгофа, верификация их на основе данных натурных исследований на рудниках с разветвленными и протяженными сетями горных выработок.
3. Совершенствование метода определения аэродинамических сопротивлений на основе проведения предварительных экспериментальных исследований в шахтных стволах и верификация его на натурных измерениях.
4. Разработка алгоритма регулирования совместной работы нескольких главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений в вентиляционных сетях рудников по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности.
5. Разработка научно-методических основ и программных средств для повышения энергоэффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции.

## **2. Совершенствование способа разработки расчетных моделей вентиляционных сетей рудников**

Интенсивное развитие горных работ, увеличение протяженности и разветвленности сетей горных выработок приводит к возникновению проблем, связанных с прогнозированием распределения воздуха в рудниках. Современные методы математического моделирования позволяют точно прогнозировать распределение воздуха [69], но зависят от корректности разработанной математической модели вентиляционной сети.

Исходными данными для создания математической модели рудничной вентиляционной сети являются аэродинамические и геометрические параметры горных выработок рудника. Процесс создания математической модели конкретной сети можно разделить на следующие этапы:

1. Проведение натурных измерений в условиях рудников [58,72] для определения аэро- и термодинамических параметров воздуха, вентиляторных установок, местных сопротивлений.
2. Обработка экспериментальных параметров.
3. Расчет аэродинамических сопротивлений выработок, параметров вентиляторных установок и построение физической модели рудника для моделирования воздухораспределения.

При проведении воздушно-депресссионной съемки встречаются выработки, доступ в которые запрещен. Из них часть завалена под кровлю, остальные перекрыты из соображений безопасности (наблюдается пучение почвы, обрушение кровли, частичное затопление выработки). В связи с этим на некоторых участках вентиляционных сетей усложняется задача увязывания давлений и расходов воздуха из-за недостатка замеренных параметров.

Непрерывное ведение горных работ на добычных горизонтах (подсечки) не позволяет проводить подробные замеры аэродинамических параметров воздуха и определять аэродинамические сопротивления горных выработок. Вследствие

этого математические модели становятся упрощенными и теряют в точности прогнозирования воздухораспределения.

Получение корректных аэродинамических сопротивлений горных выработок на горизонтах подсечки и дальнейшее прогнозирование воздухораспределения всего рудника возможно при условии имеющихся подробных данных распределения давлений и расходов воздуха.

В связи с тем, что увязывание давлений и расходов воздуха выполняется вручную, возникает вероятность неверного определения аэродинамических сопротивлений горных выработок. Определяющим фактором точной увязки аэродинамических параметров воздуха и дальнейшего создания математической модели будет опыт исследователя.

При отсутствии расходов воздуха и перепадов давлений в выработках аэродинамические сопротивления определяют по геометрическим параметрам и коэффициенту аэродинамического сопротивления.

В этом разделе описан автоматизированный способ увязки давлений и расходов воздуха с целью получения аэродинамических сопротивлений горных выработок, разработанный для создания корректной расчетной модели вентиляционной сети.

## **2.1 Разработка автоматизированного способа обработки данных воздушно-депрессионных съемок рудников для создания корректной математической модели**

В основу автоматизированного способа обработки данных воздушно-депрессионных съемок (ВДС) заложена унификация и автоматизация процесса увязки давлений и расходов воздуха с дальнейшим определением аэродинамических сопротивлений.

В условиях подземных рудников автоматизированный способ обработки данных ВДС позволяет значительно уменьшить трудоемкость и продолжительность работ по увязыванию.

Процесс автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки разбивается на несколько этапов:

- Увязывание расходов воздуха в сети горных выработок с дальнейшей корректировкой аэродинамических сопротивлений, изначально определяемых по проектным данным.

- Увязывание давлений в сети горных выработок, используя данные распределений расходов воздуха.

- Расчет аэродинамических сопротивлений горных выработок используя распределения давлений и расходов воздуха в вентиляционной сети.

Приведенная выше последовательность обработки данных ВДС выстроена с учетом того, что данные воздушной съемки можно обработать независимо от данных барометрической съемки, согласно 1-му закону Кирхгофа [103]. Помимо этого, точность измерения расходов выше точности измерения давлений.

Для выполнения увязывания давлений и расходов воздуха с использованием алгоритма автоматизированной обработки данных ВДС требуется внести исходные данные в математическую модель вентиляционной сети [6]:

- проектные геометрические параметры горных выработок (длины и сечения);
- справочные коэффициенты аэродинамического сопротивления;
- расходы воздуха, замеренные в период проведения воздушно-депресссионной съемки, в основных выработках рудника;
- давления, замеренные в период проведения воздушно-депресссионной съемки, в основных сопряжениях горных выработок;
- аэродинамические сопротивления средств отрицательного регулирования (натурные измерения);
- аэродинамические параметры источников тяги (натурные измерения).

На основании этих данных производится расчет проектных аэродинамических сопротивлений с дальнейшей корректировкой до определения фактических (эксплуатационных) аэродинамических сопротивлений.

### **2.1.1 Автоматическое увязывание расходов воздуха в рудничной вентиляционной сети**

В связи с тем, что вентиляционные процессы в сетях рудников нестационарны, возникают ситуации, при которых образуются несогласованные замеры расходов воздуха внутри вентиляционной сети.

На первом этапе автоматизированной обработки данных ВДС производится автоматическое увязывание расходов воздуха. Для этого разрабатывается геометрическая модель вентиляционной сети рудника.

Разработка геометрической модели невозможно без внесения проектных геометрических параметров горных выработок (длины и сечения), справочных коэффициентов аэродинамического сопротивления. Далее рассчитываются проектные значения аэродинамических сопротивлений горных выработок рудника. Следующим шагом задаются все замеренные расходы воздуха [6].

Увязывание расходов воздуха производится следующим образом. Последовательно выполняются:

1. Разбиение вентиляционной сети на подсети.
2. Для каждой подсети рассчитывается стационарное воздухораспределение  $\mathbf{Q} = \{Q_1, \dots, Q_N\}$ , определяется невязка воздуха между подсетями [56].
3. Корректируются расходы с учетом невязки.

Процесс (2-3) повторяется до тех пор, пока не распределится невязка между подсетями ( $\varepsilon_Q < \varepsilon_{Q0}$ ). В результате этого получаем распределение расходов во всей вентиляционной сети.

На основании описанных действий разработан алгоритм автоматического увязывания расходов воздуха.

По результатам увязывания получается подробное распределение расходов воздуха в вентиляционной сети. Корректность полученного распределения зависит от количества выполненных замеров расходов воздуха в вентиляционной сети и от правильности выбранных мест проведения замеров.

На рисунке 2.1 показаны результаты автоматического увязывания расходов воздуха на упрощенной математической модели типовой вентиляционной сети рудника с центральной схемой проветривания.

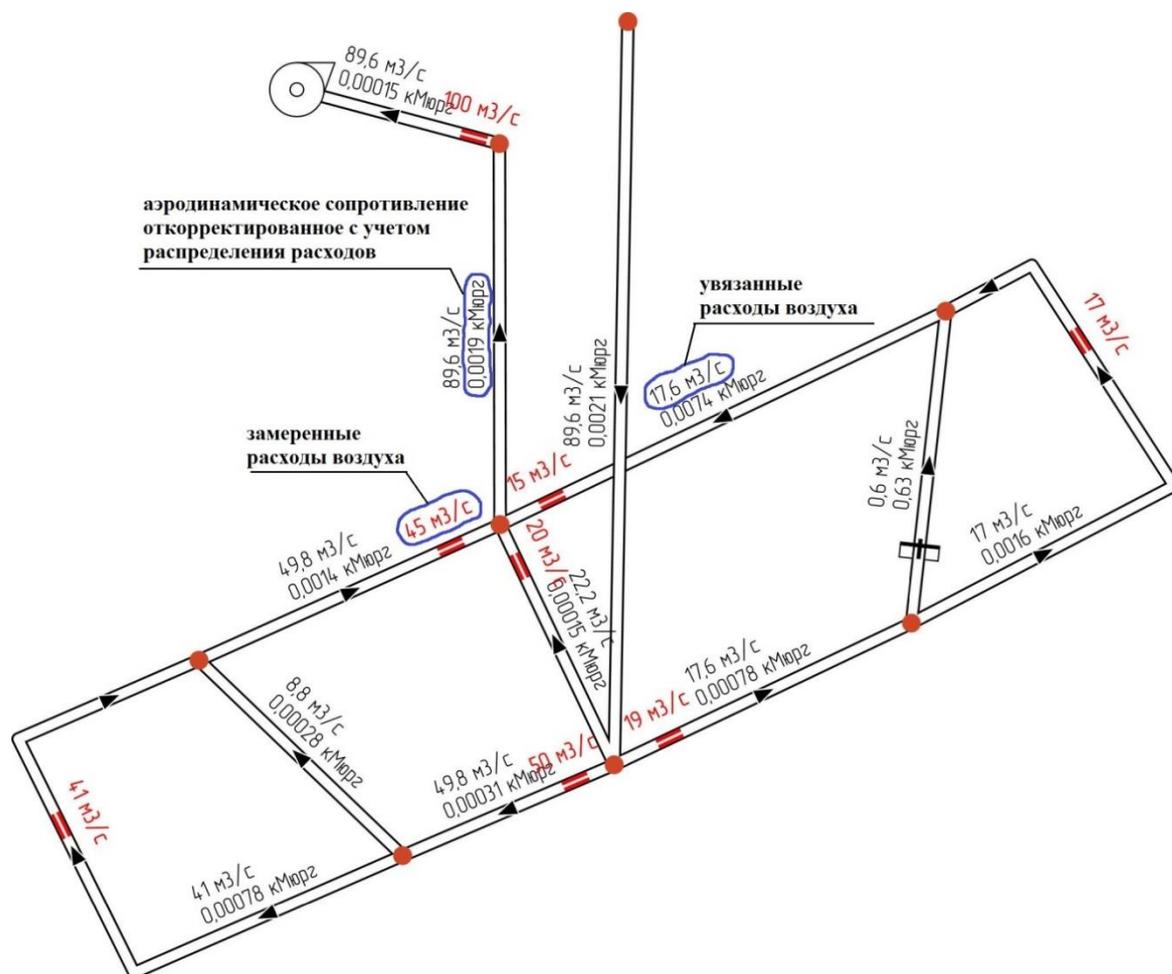


Рисунок 2.1 — Распределение расходов в упрощенной математической модели вентиляционной сети

По результатам применения автоматического увязывания расходов воздуха получены: подробное распределение воздуха в модели вентиляционной сети, а также откорректированные с учетом увязанных расходов аэродинамические сопротивления горных выработок.

### 2.1.2 Автоматическое увязывание давлений в рудничной вентиляционной сети

На втором этапе автоматизированной обработки данных воздушно-депрессионной съемки производится автоматическое увязывание давлений. Для

этого используются результаты, полученные после автоматического увязывания расходов воздуха: аэродинамические сопротивления горных выработок, откорректированные с учетом распределенных расходов воздуха и увязанные расходы.

Математическую модель вентиляционной сети с увязанными расходами и с откорректированными аэродинамическими сопротивлениями горных выработок требуется дополнить замеренными значениями давления воздуха. Корректность распределения давлений зависит от подробности и точности замеренных значений давления.

Увязывание поля давлений также происходит итерационно. Перед выполнением итерационной процедуры задаются начальные значения давлений во всех узлах вентиляционной сети рудника.

В случае если в узле №  $i$  есть замеренное значение давления, то оно и задается в качестве начального значения. Все узлы с замеренными значениями давления объединяются в множество  $V_{ЗАМ}$ .

В случае если в узле №  $i$  вентиляционной сети рудника замеров давления не проводилось, то в качестве начального значения давления принимается ноль. Все узлы, в которых отсутствуют замеренные значения давления, объединяются в множество  $V_{КОРР}$ . Индекс показывает, что именно это множество узловых давлений будет корректироваться в ходе автоматизированного увязывания давлений.

Далее на каждом шаге итерационной процедуры давления в каждом узле №  $i$  из множества  $V_{КОРР}$  пересчитываются по формуле

$$p_i^{new} = p_i(1-2s) + 2s \cdot \langle p \rangle, \quad (2.1)$$

где

$s < 0.5$  — параметр усреднения давления, аналогичный по смыслу параметру дискретизации при решении диффузионного уравнения методом конечных разностей [88,99];

$\langle p \rangle$  — среднее значение давлений в смежных узлах с узлом №  $i$ .

В случае если в узел №  $i$  входит единственная выработка и выходит единственная выработка, выражение  $\langle p \rangle$  имеет вид

$$\langle p \rangle = \frac{\frac{P_{in} + P_{out}}{D_{in} + D_{out}}}{\frac{1}{D_{in}} + \frac{1}{D_{out}}}, \quad (2.2)$$

где  $P_{in}$  — давление в смежном узле со стороны входящей в узел №  $i$  выработки;

$P_{out}$  — давление в смежном узле со стороны исходящей из узла №  $i$  выработки;

$D_{in} = R_{in} Q_{in}^2$  — модельная депрессия во входящей выработке, рассчитанная на основании результатов увязывания расходов;

$D_{out} = R_{out} Q_{out}^2$  — модельная депрессия в исходящей выработке, рассчитанная на основании результатов увязывания расходов.

В случае  $D_{in} = D_{out}$  формула (2.2) превращается в среднее арифметическое значение давлений в смежных узлах.

В общем случае произвольного количества входящих в узел №  $i$  и исходящих из него выработок, а также наличия источников тяги, выражение  $\langle p \rangle$  имеет вид

$$\langle p \rangle = \frac{\sum \frac{(p_i - H_j)}{D_j}}{\sum \frac{1}{D_j}}, \quad (2.3)$$

где

$H_j$  — источник тяги в выработке №  $j$ , инцидентной узлу №  $i$ , а суммирование осуществляется по всем входящим и исходящим из узла №  $i$  выработкам.

Искомый перепад давлений пропорционален модельной депрессии горных выработок  $D = RQ^2$ , определяемой через увязанный расход воздуха и аэродинамическое сопротивление, откорректированное с учетом увязанных расходов. При этом по абсолютной величине перепады давления подобраны таким образом, чтобы соответствовать депрессии источников тяги в сети.

На рисунке 2.2 показаны результаты автоматического увязывания давлений на упрощенной схеме математической модели вентиляционной сети рудника с центральной схемой проветривания.

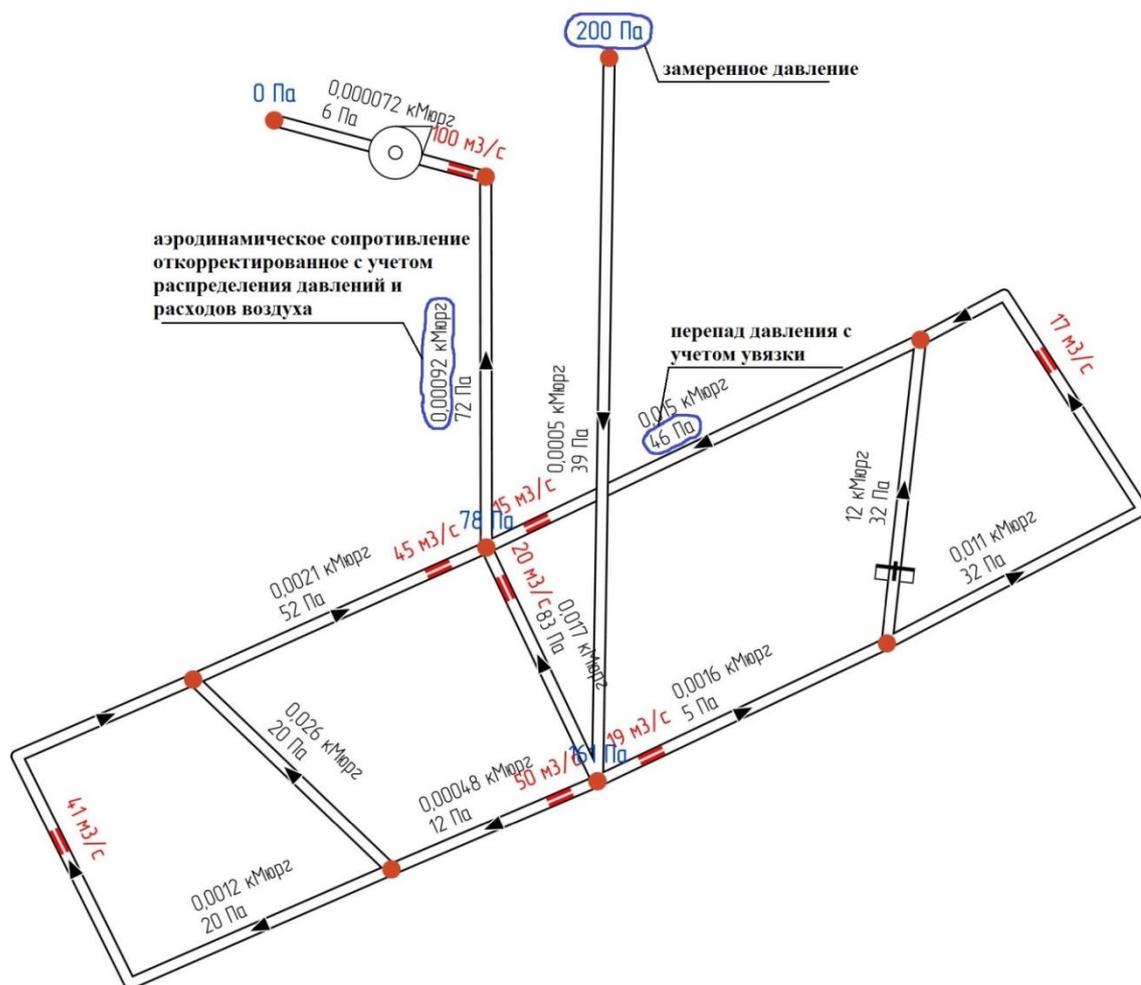


Рисунок 2.2 — Распределение давлений в упрощенной математической модели вентиляционной сети

По результатам использования автоматического увязывания давлений получены перепады давлений во всех выработках математической модели вентиляционной сети.

### 2.1.3 Расчет аэродинамических сопротивлений горных выработок на основании увязанных давлений, увязанных расходов воздуха и параметров источников тяги

Третий этап автоматизированной обработки данных воздушно-депрессионной съемки характеризуется расчетом истинных аэродинамических

сопротивлений всех горных выработок №  $j$  ( $j = 1, \dots, N$ ) в вентиляционной сети на основании увязанных давлений и расходов воздуха.

$$R_j = \frac{\Delta p_j}{Q_j^2}. \quad (2.4)$$

На рисунке 2.3 представлена схема работы алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки.



Рисунок 2.3 — Схема работы алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки

Приведенная схема описывает последовательность работ, выполняемых алгоритмом определения аэродинамических сопротивлений горных выработок, и необходимые исходные данные для выполнения каждого из этапов работ автоматизированной обработки [6].

В разделе 2.1.1 изложена последовательность работ, выполняемых алгоритмом увязывания расходов воздуха. Алгоритм позволяет автоматически определять распределение расходов воздуха на основании проектных данных (длин, сечений, коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок) и экспериментальных значений количества воздуха. Результаты расчета, полученные с помощью данного алгоритма, а именно - расходы воздуха в

горных выработках - используются в качестве исходных данных для алгоритма определения распределений давлений.

В разделе 2.1.2 описаны принципы работы алгоритма, позволяющего на основании распределенных расходов воздуха и скорректированных (с учетом увязанных расходов) аэродинамических сопротивлений автоматически определять распределение давлений.

Таким образом, исходя из полученного распределения давлений и расходов воздуха, можно вычислить значения фактических аэродинамических сопротивлений горных выработок.

## **2.2 Программная реализация алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки в аналитическом комплексе «АэроСеть»**

Для унификации и автоматизации процесса обработки экспериментальных замеров разработан и реализован алгоритм автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки на базе аналитического комплекса «АэроСеть».

Алгоритм позволяет производить автоматическое увязывание давлений и расходов воздуха в вентиляционной сети рудников, а затем на основании полученных значений рассчитывать аэродинамические сопротивления горных выработок.

Для повышения корректности автоматического увязывания давлений и расходов воздуха в условиях разветвленных сетей подземных рудников, а также для исключения ошибок, связанных с нестационарностью вентиляционной сети, рекомендуется предварительно упростить вентиляционную сеть и произвести ручное увязывание давлений и расходов воздуха. Упрощение вентиляционной сети необходимо выполнить до воздухоподающих и вентиляционных шахтных стволов, а также эквивалентных ветвей (соответствующих горизонтам), соединяющих стволы.

На рисунке 2.4 представлено окно АК «АэроСеть», отображающее модули автоматического увязывания давлений и расходов воздуха.

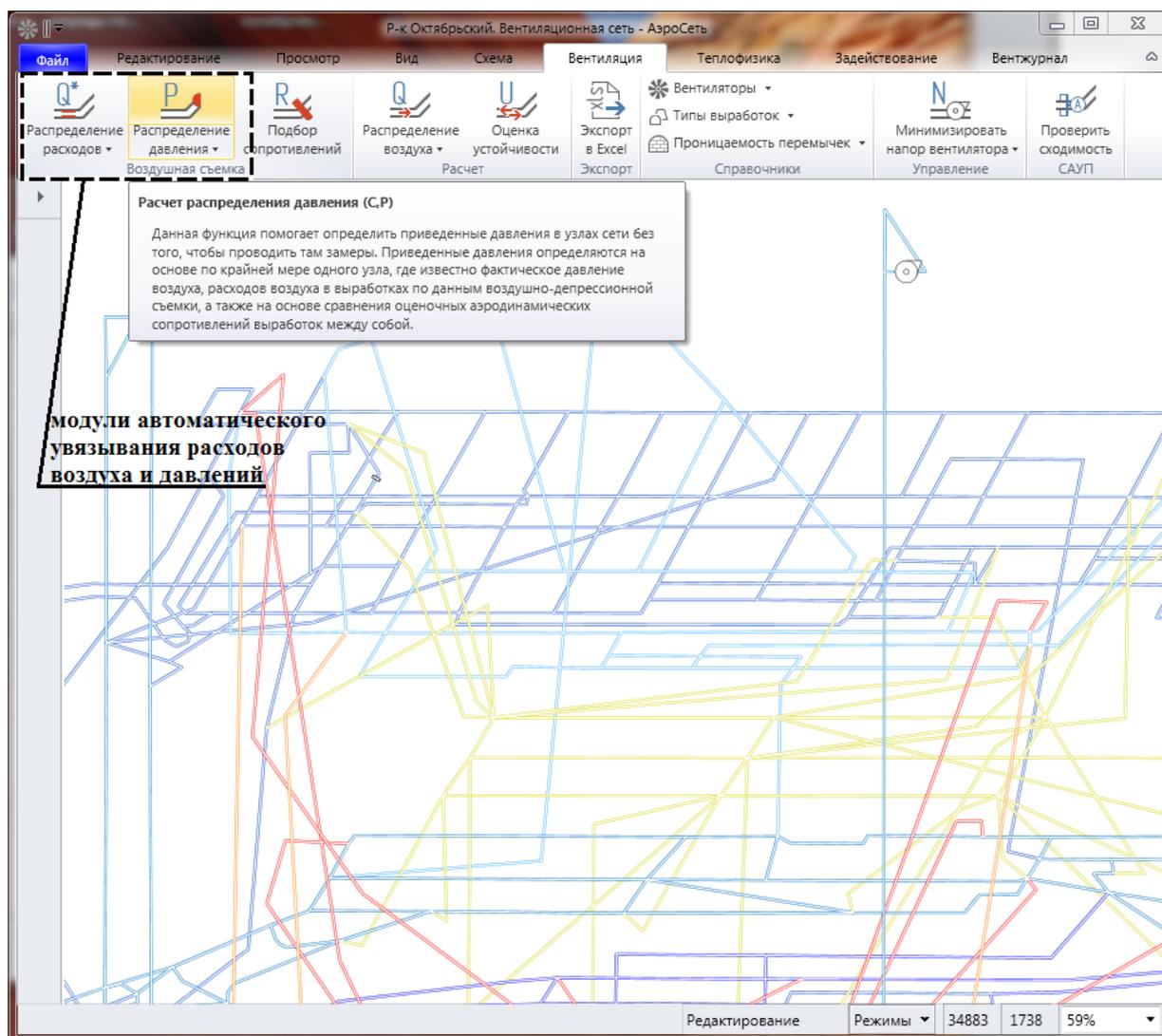


Рисунок 2.4 — Окно аналитического комплекса «АэроСеть» для автоматического увязывания давлений и расходов воздуха

На первом этапе автоматизированной обработки алгоритмом производится увязывание расходов воздуха в вентиляционной сети рудника до момента соблюдения первого закона Кирхгофа. По результатам увязывания расходов воздуха корректируются аэродинамические сопротивления горных выработок. Далее алгоритмом производится увязывание давлений в вентиляционной сети. По результатам полученных распределений расходов воздуха и давлений рассчитываются аэродинамические сопротивления горных выработок [6].

Блок-схема реализованного алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депрессионной съемки представлена на рисунках 2.5 и 2.6:

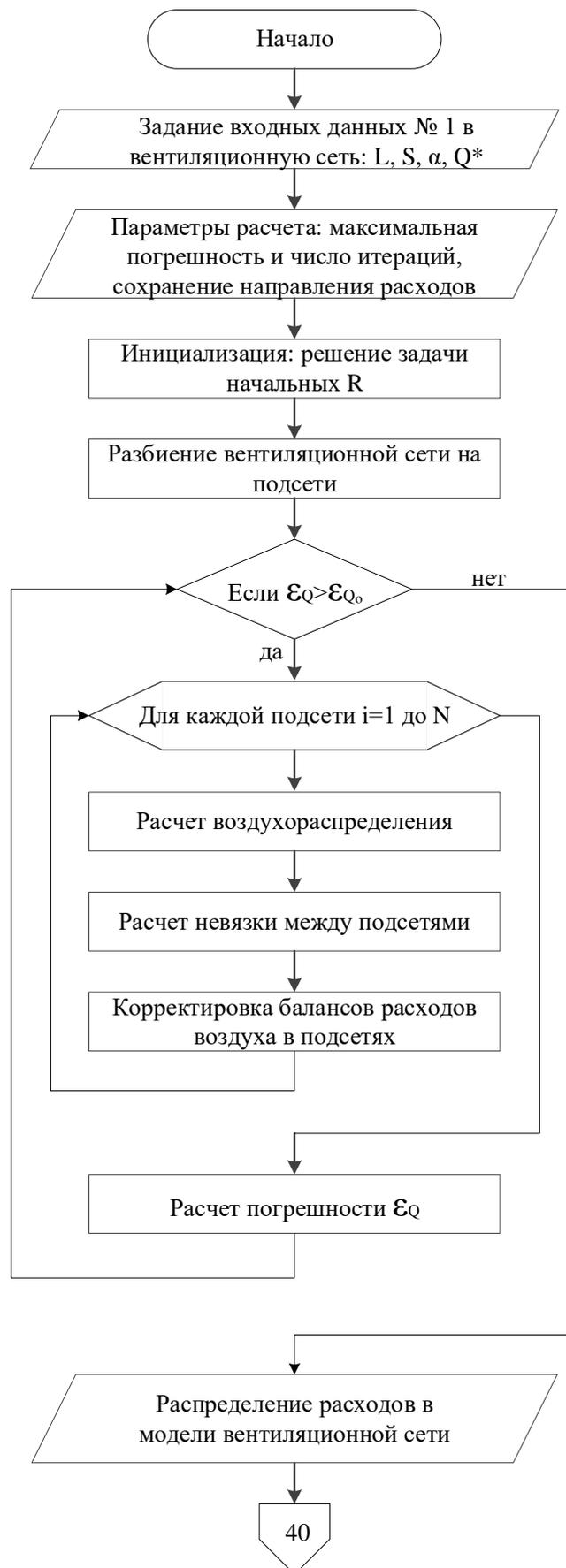


Рисунок 2.5 — Блок-схема алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки

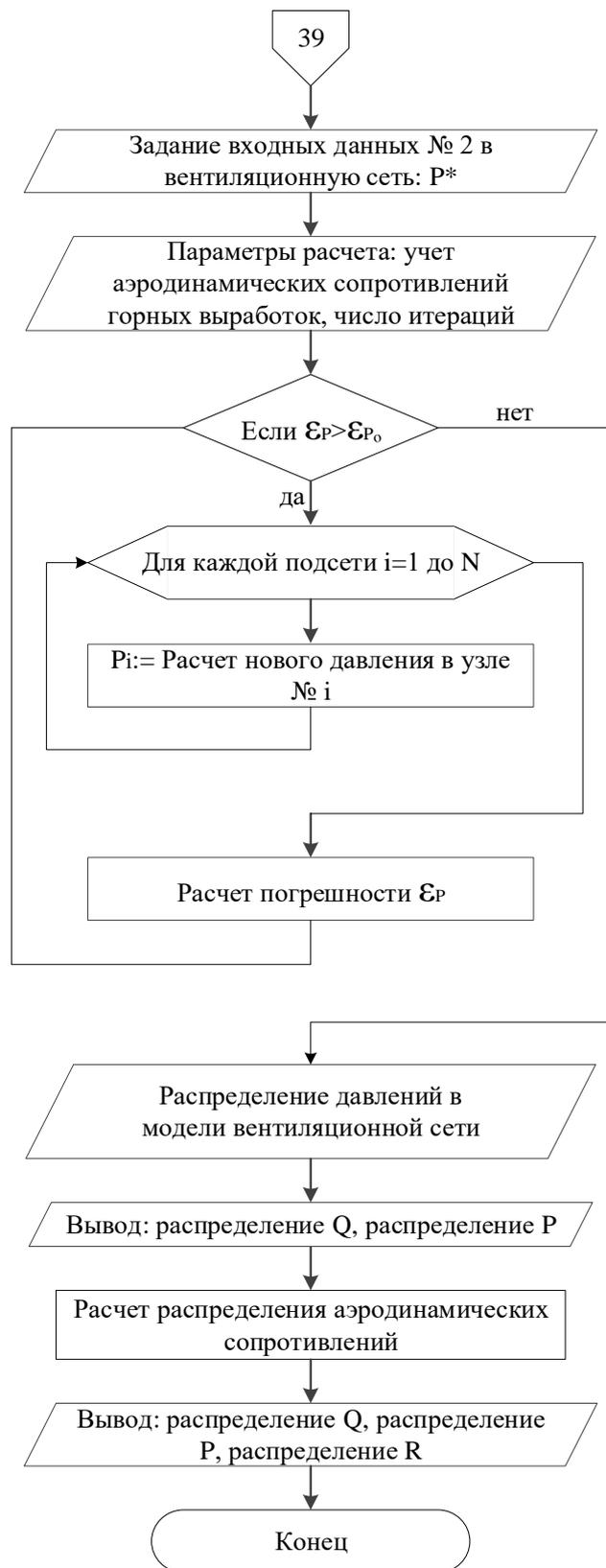


Рисунок 2.6 — Блок-схема алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки (продолжение)

Применение алгоритма автоматизированной обработки данных ВДС, реализованного в аналитическом комплексе «АэроСеть», позволяет

унифицировать и автоматизировать процесс увязывания замеренных расходов воздуха и давлений.

### **2.3 Верификация алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки рудников в аналитическом комплексе «АэроСеть»**

Разработанный алгоритм автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки верифицирован. Для доказательства достоверности результатов автоматизированной обработки данных произведено сравнение с результатами ручной обработки. Данные для сравнения получены на основании проведенной воздушно-депресссионной съемки разветвленного и протяженного рудника «Октябрьский» ПАО ЗФ «ГМК «Норильский Никель».

В период проведения воздушно-депресссионной съемки замерены расходы воздуха и давления в выработках вентиляционной сети рудника «Октябрьский». По результатам проведенной ВДС разработана математическая модель вентиляционной сети, изображенная на рисунке 2.7. Модель повторяет сложную топологию рудника «Октябрьский».

Запасы медно-никелевых руд шахтного поля рудника «Октябрьский» вскрыты 11 вертикальными стволами (4 из них вентиляционные, остальные воздухоподающие). Рудник «Октябрьский» ПАО ЗФ «ГМК «Норильский Никель» проветривается всасывающим способом. Схема проветривания — фланговая. Свежий воздух подается по вертикальным стволам: клетьевым стволам (КС-1, КС-2), скиповым стволам (СС-1, СС-2), грузовому стволу (ГС), вспомогательному закладочному стволу (ВЗС) и вспомогательному скиповому стволу (ВСС). В руднике воздух распределяется по откаточным, транспортным и восстающим горным выработкам откаточных горизонтов -700 м, -750 м, -800 м, -850 м, -906 м, -957 м. Далее воздух поступает в очистные, подготовительные, нарезные, горно-капитальные выработки и технологические камеры. После проветривания рабочих зон и технологических камер отработанный воздух выдается на выработки вентиляционно-закладочных горизонтов -500 м, -550 м, -600 м, -650 м,

-800 м, -850 м. Далее воздух движется по стволам ВС-1, ВС-2, ВС-3, ВС-4 до вентиляционных каналов и удаляется в атмосферу.

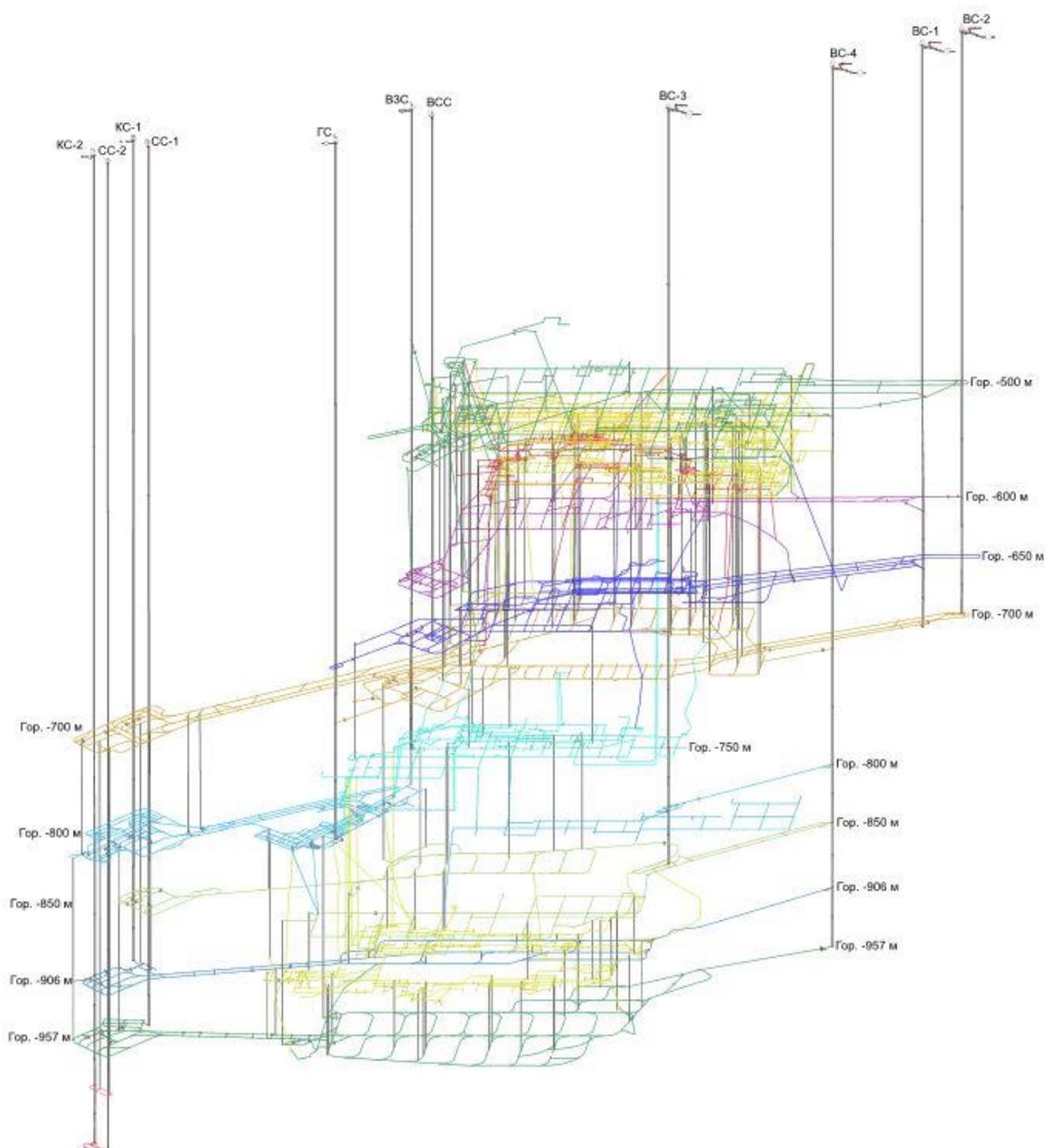


Рисунок 2.7 — Топология модели вентиляционной сети рудника «Октябрьский», разработанная в АК «АэроСеть»

В математическую модель вентиляционной сети занесены проектные длины, сечения горных выработок и коэффициенты аэродинамических сопротивлений. Также на большинство ветвей математической модели нанесены замеренные расходы воздуха, а на большинство узлов замеренные давления.

На основании входных данных (проектных аэродинамических сопротивлений, замеренных расходов воздуха и замеренных давлений) производилось автоматическое увязывание расходов воздуха и давлений с дальнейшим расчетом аэродинамических сопротивлений горных выработок для создания корректной математической модели вентиляционной сети рудника. Также производилась ручная обработка данных воздушно-депресссионной съемки, которая включала в себя ручное увязывание расходов воздуха и давлений на схеме вентиляционной сети рудника.

Для автоматического увязывания расходов воздуха разработана математическая модель вентиляционной сети горизонта -700 м рудника «Октябрьский» в АК «АэроСеть» (рис. 2.8). На модели расставлены замерные станции (места, в которых проводились замеры) и заданы замеренные на них расходы.

В таблице 2.1 приведены результаты ручного и автоматического увязывания расходов воздуха основных воздухоподающих и вентиляционных выработок горизонта -700 метров, замеренных в ходе проведения воздушно-депресссионной съемки рудника «Октябрьский».

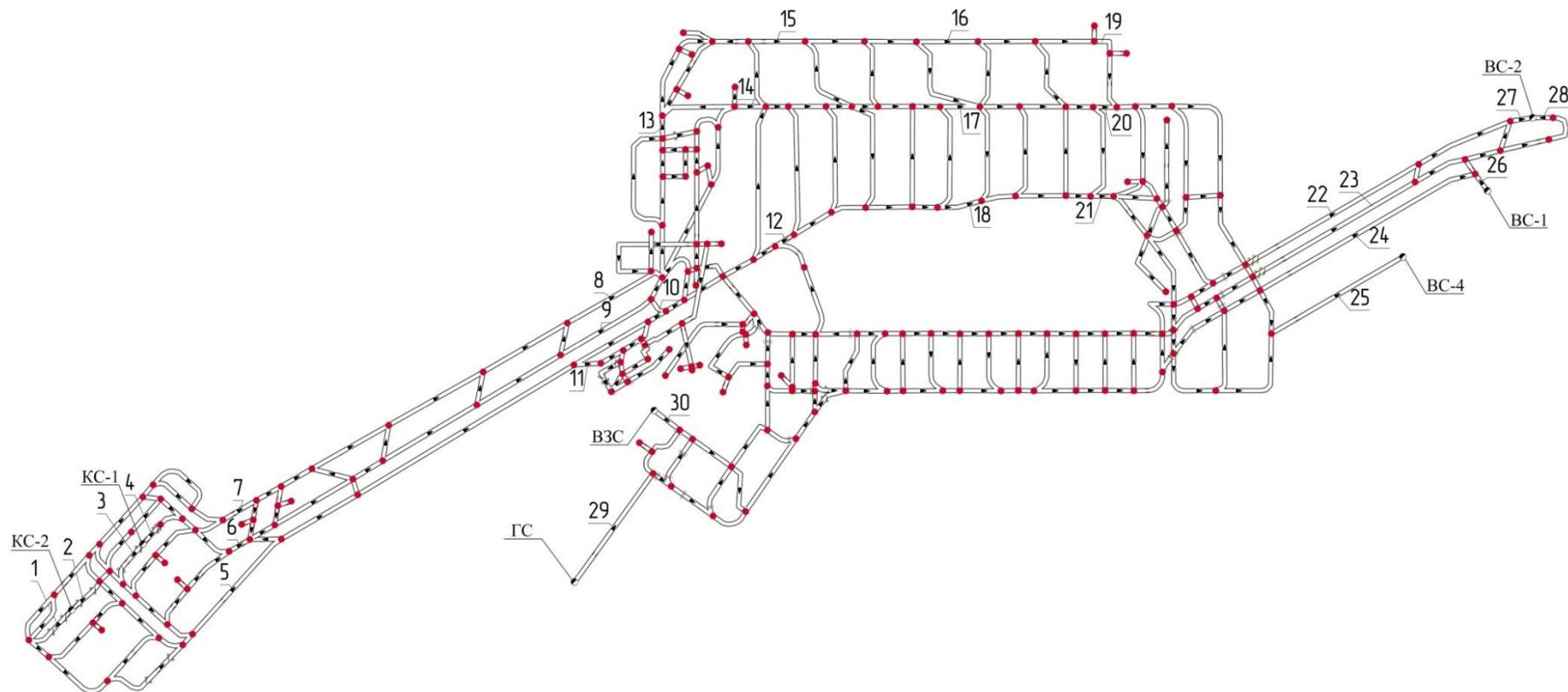


Рисунок 2.8 — Схема расположения выработок на математической модели вентиляционной сети горизонта -700 м рудника «Октябрьский», разработанная в АК «АэроСеть» для увязки расходов

Таблица 2.1 — Сравнение результатов ручного и автоматизированного распределений расходов воздуха в выработках горизонта -700 м рудника «Октябрьский»

№	Название выработки	Замеренные расходы, м <sup>3</sup> /с	Ручная обработка, м <sup>3</sup> /с	Автоматизированная обработка, м <sup>3</sup> /с	Относительная погрешность $\epsilon_Q$ , %
1	ЮКВ КС-2	10,3	10,3	7,7	-25,2
2	СКВ КС-2	56	56	56,2	0,36
3	ВКВ КС-1	62	62	62,2	0,32
4	ЗКВ КС-1	59,7	59,7	59,9	0,34
5	Обгонная ветвь	74,2	74,2	74	-0,27
6	Грузовой квершлаг (перед сопряжением с южной разгрузочной ветвью)	61,5	59,3	61,3	3,37
7	Грузовой квершлаг № 2 (перед сопряжением с южной разгрузочной ветвью)	74,4	71,4	74,2	3,92
8	Грузовой квершлаг № 2 (после сопряжения с вентиляционной сбойкой № 1)	—	97,1	101	4,02
9	Грузовой квершлаг (после сопряжения с вентиляционной сбойкой № 1)	—	74,4	76,6	2,96
10	Порожняковый квершлаг (после сопряжения со складом ВМ)	—	22,5	23,7	5,33
11	Заезд на склад ВМ	32,6	32,6	32,6	0
12	Порожняковый квершлаг (после сопряжения с ССВ)	58,9	57,6	59,6	3,47
13	ЮСК (перед сопряжением с западным откаточным штреком)	34,9	34,9	34,9	0
14	Западный откаточный штрек (перед сопряжением с откаточным квершлагом № 10)	—	18,8	18,8	0

15	Западный откаточный штрек бис (после сопряжения с откаточным квершлагом № 10 зап.)	27,2	27,2	30,1	10,7
16	Западный откаточный штрек бис (перед сопряжением с откаточным квершлагом № 6 зап.)	—	28,9	29,3	1,38
17	Западный откаточный штрек (после сопряжения с откаточным квершлагом № 7)	—	42,6	43,4	1,88
18	Восточный откаточный штрек (перед откаточным квершлагом № 6)	—	29	28,3	-2,41
19	Западный откаточный штрек бис (перед откаточным квершлагом № 4 зап.)	—	31,8	28,6	-10,06
20	Западный откаточный штрек (после сопряжения с откаточным квершлагом № 4)	28,3	27,1	25,4	-6,27
21	Восточный откаточный штрек (после сопряжения с откаточным квершлагом № 4)	36,2	32,7	32,5	-0,61
22	Западный вентиляционный квершлаг	2,2	2,2	2,2	0
23	Промежуточный вентиляционный квершлаг	19,1	16,1	19,1	18,63
24	Восточный вентиляционный квершлаг	11,5	11,5	11,5	0
25	Соединительный квершлаг ВС-4	10	11	10	-9,09
26	Выработка ствола ВС-1	—	8,4	8,4	0
27	Выработка ствола ВС-2 (со стороны западного вентиляционного квершлага)	—	32,5	35,5	9,23

28	Выработка ствола ВС-2 (со стороны промежуточного вентиляционного квершлага)	—	5,7	5,7	0
29	Соединительный квершлаг ГС	7,2	7,2	7,7	6,94
30	Выработка ствола ВЗС	2,1	2,1	2,3	9,52

Результаты ручной и автоматизированной обработки данных воздухораспределения показали, что при меньших расходах в горных выработках увеличивается относительная погрешность между способами увязывания. Это связано с тем, что разница в абсолютных значениях при маленьких расходах существенно сказывается на относительной погрешности.

На рисунке 2.9 показаны выработки, в которых сравнивались значения давлений, полученные в результате ручного и автоматического увязывания.

В таблице 2.2 представлены результаты ручного и автоматического увязывания давлений в основных воздухоподающих и вентиляционных выработках горизонта -700 метров, замеренных в ходе проведения воздушно-депресссионной съемки рудника «Октябрьский».

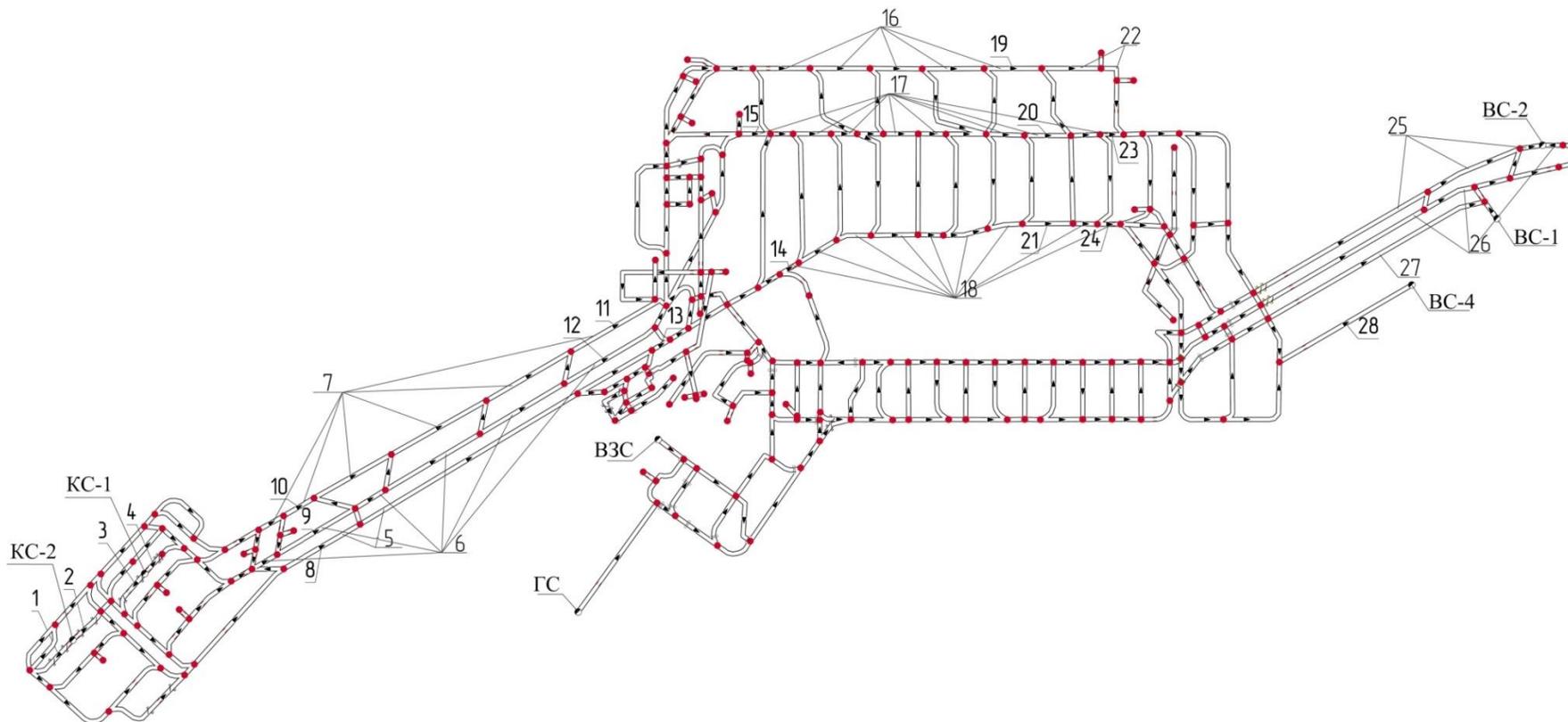


Рисунок 2.9 — Схема расположения выработок на математической модели вентиляционной сети горизонта -700 м рудника «Октябрьский», разработанная в АК «АэроСеть» для увязки давлений

Таблица 2.2 — Сравнение результатов ручного и автоматизированного распределения давлений в выработках горизонта -700 м рудника «Октябрьский»

№	Название ветви	Замеренные депрессии, Па	Ручная обработка, Па	Автоматизированная обработка, Па	Относительная погрешность $\epsilon_p$ , %
1	ЮКВ КС-2	155	155	155	0
2	СКВ КС-2	147	147	147	0
3	ВКВ КС-1	48	48	48	0
4	ЗКВ КС-1	99	99	99	0
5	Порожняковый квершлаг (участок между съездом № 4 и заездом на склад ВМ)	416	416	416	0
6	Грузовой квершлаг (участок между съездом № 4 и транспортным заездом)	449	449	449	0
7	Грузовой квершлаг № 2 (участок между южной разгрузочной ветвью и пассажирским вокзалом)	457	457	457	0
8	Порожняковый квершлаг (участок между съездом № 4 и съездом № 3)	—	142	151	6,3
9	Грузовой квершлаг (участок между северной разгрузочной ветвью и заездом № 5)	—	99	107	8,1
10	Грузовой квершлаг № 2 (участок между северной разгрузочной ветвью и заездом № 5)	—	67	85	26,9
11	Грузовой квершлаг № 2 (участок между вентиляционной сбойкой 1 и ЮСК)	—	37	30	-18,9
12	Грузовой квершлаг (участок между вентиляционной сбойкой 1 и транспортным заездом)	—	34	32	-5,9

13	Порожняковый квершлаг (участок между заездом на склад ВМ и транспортным заездом)	—	51	48	-5,9
14	Порожняковый квершлаг (участок между ССВ и откаточным квершлагом № 9 бис)	—	22	21	-4,5
15	Западный откаточный штрек (участок между откаточным квершлагом № 11 и откаточным квершлагом № 10)	16	16	16	0
16	Западный откаточный штрек бис (участок между откаточным квершлагом 10 зап. и откаточным квершлагом 5 зап.)	32	32	32	0
17	Западный откаточный штрек (участок между откаточным квершлагом № 11 и откаточным квершлагом № 4 зап.)	106	106	106	0
18	Восточный откаточный штрек (участок между ССВ и соединительным квершлагом 1)	151	151	151	0
19	Западный откаточный штрек бис (участок между откаточным квершлагом № 6 зап. и откаточным квершлагом № 5 зап.)	—	25	23	-8
20	Западный откаточный штрек бис (участок между откаточным квершлагом № 5 и откаточным квершлагом № 5 бис)	—	12	13	8,3
21	Западный откаточный штрек (участок между откаточным квершлагом № 5 бис и откаточным квершлагом №5)	—	19	22	5,3
22	Западный откаточный штрек бис (участок между	27	27	27	0

	откаточным квершлагом № 5 зап. и откаточным квершлагом № 4 зап.)				
23	Западный откаточный штрек (участок между откаточным квершлагом № 4 и откаточным квершлагом № 4 зап.)	—	7	13	85,7
24	Восточный откаточный штрек (участок между откаточным квершлагом № 4 и соединительным квершлагом 1)	—	11	19	72,7
25 <sup>1</sup>	Западный вентиляционный квершлаг (участок от соединительного квершлага 2 до ствола ВС-2)	235	235	235	0
26 <sup>1</sup>	Промежуточный вентиляционный квершлаг (участок от соединительного квершлага 2 до ствола ВС-2)	211	211	211	0
27 <sup>1</sup>	Восточный вентиляционный квершлаг (участок от соединительного квершлага 2 до ствола ВС-1)	131	131	131	0
28	Соединительный квершлаг ВС-4	22	22	22	0

<sup>1</sup> – в выработке присутствует вентиляционное сооружение. Потеря давления на выработке определена с учетом этого вентиляционного сооружения: 25<sup>1</sup> – потеря давления на выработке составляет 235 Па (из них 223 Па теряется на вентиляционных дверях, остальные 12 Па - потеря давления на западном вентиляционном квершлагае); 26<sup>1</sup> – потеря давления на выработке составляет 211 Па (из них 195 Па теряется на вентиляционных дверях, остальные 16 Па - потеря давления на промежуточном вентиляционном квершлагае); 27<sup>1</sup> – потеря давления на выработке составляет 131 Па (из них 120 Па теряется на вентиляционных

дверях, остальные 11 Па - потеря давления на восточном вентиляционном квершлаге).

На основании результатов ручного и автоматического увязывания давлений основных воздухоподающих и вентиляционных выработок можно сделать вывод, что относительная погрешность результатов ручной обработки относительно автоматизированной в выработках № 23 и № 24 превышает допустимые значения. Это связано с тем, что в данных выработках значения давлений небольшие и небольшая разница в абсолютных значениях приводит к большой относительной погрешности.

По результатам увязанных расходов воздуха и давлений рассчитываются аэродинамические сопротивления горных выработок.

#### **2.4 Выводы по главе**

В результате проведенных исследований, направленных на совершенствование методов разработки расчетных моделей вентиляционных сетей подземных рудников, можно сделать следующие выводы:

1. Для создания корректных математических моделей вентиляционных сетей рудников разработан автоматизированный способ обработки данных воздушно-депрессионных съемок на основании автоматического увязывания расходов воздуха и давлений.
2. Разработанные алгоритмы автоматического увязывания замеренных значений расходов воздуха и давлений, которые служат для получения подробных распределений расходов и давлений, обеспечивают расчетную модель вентиляционной сети основными исходными данными.
3. Процесс увязывания расходов воздуха и давлений для расчета действительных аэродинамических сопротивлений горных выработок на основании полученных распределений расходов воздуха и давлений унифицирован и автоматизирован.

4. Алгоритм автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки, который позволяет разрабатывать корректные математические модели вентиляционных сетей подземных рудников, верифицирован.

### **3. Экспериментальные исследования линейных аэродинамических сопротивлений шахтных стволов**

Основой для проектирования вентиляции рудников является создание расчетной вентиляционной сети. Расчетная вентиляционная сеть представляет собой математическую модель рудничной вентиляционной сети. Корректное определение аэродинамических параметров [63] рудничной вентиляционной сети является основной задачей разработки расчетной вентиляционной сети. Одним из таких параметров является аэродинамическое сопротивление горных выработок.

Основная часть депрессии приходится на стволы [37], поэтому точность определения их аэродинамических сопротивлений обуславливает точность прогнозирования воздухораспределения в горных выработках, как на этапе проектирования рудника, так и в процессе его эксплуатации. Причинами потери давления при движении воздушных потоков по выработкам являются шероховатость стенок (трение), а также различные препятствия на пути движения воздуха. На шахтных стволах потеря давления обусловлена преодолением воздушными потоками препятствий в виде расстрелов, лестничного и трубного отделений, а также трением о крепь ствола.

Многообразие вариантов армирования шахтных стволов не позволяет с необходимой точностью классифицировать стволы по аэродинамическим сопротивлениям — они (сопротивления) должны определяться индивидуально для каждого ствола на основании экспериментальных замеров или результатов численного моделирования типовых стволов [25].

Для разработки методики определения аэродинамического сопротивления шахтных стволов необходимо решить следующие задачи:

- определить границы исследуемых участков стволов;
- исследовать факторы, влияющие на аэродинамические сопротивления стволов;
- вычислить требуемое количество измерений в пределах исследуемого участка;

- подготовить план для проведения натурных измерений;
- провести обработку данных экспериментальных измерений;
- выполнить верификацию методики проведения экспериментальных исследований.

### **3.1 Определение замерных участков шахтных стволов и мест замера**

При решении задачи необходимо определить границы замерного участка стволов и количество замерных станций вдоль этого участка.

Определение границ исследуемых зон стволов осуществляется на основании численного моделирования смешивания и разделения воздушных потоков на различных участках стволов: 1) сопряжение «ствол – калориферный канал» и сопряжение «ствол – горизонт»; 2) сопряжение «ствол – горизонт» и сопряжение «ствол – вентиляционный канал».

Обоснование количества замерных станций вдоль участков выполняется путем проведения экспериментальных исследований изменения давления, температуры и плотности воздуха по длине ствола [26].

#### **3.1.1 Определение границ замерных участков шахтных стволов по результатам численного моделирования**

Исследования ученых показывают, что нет единого мнения о границах замерных участков стволов. В соответствии с [89], расстояние до начальной точки проведения замеров варьируется от 12 до 50 калибров ствола. Необходимо учитывать, что длина линейных участков некоторых стволов (без сопряжения с горизонтом) достигает 50 калибров. Согласно [28,42,61,78] линейное аэродинамическое сопротивление стволов измеряют на участках, длина которых не менее 100 метров.

Определение границ замерных участков (начальной и конечной точки) выполнено по результатам численного моделирования. Рассмотрены случаи смешивания и разделения воздушных потоков. Исходными данными для выполнения численного моделирования послужили аэродинамические и

термодинамические параметры воздуха, полученные путем проведения предварительных экспериментальных замеров.

Экспериментальное измерение термодинамических параметров воздуха проводилось со смотровых площадок скипов и клетей по всему сечению ствола. На рисунке 3.1 показаны места проведения экспериментальных измерений термодинамических параметров воздуха по длине ствола КС-2 рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель».

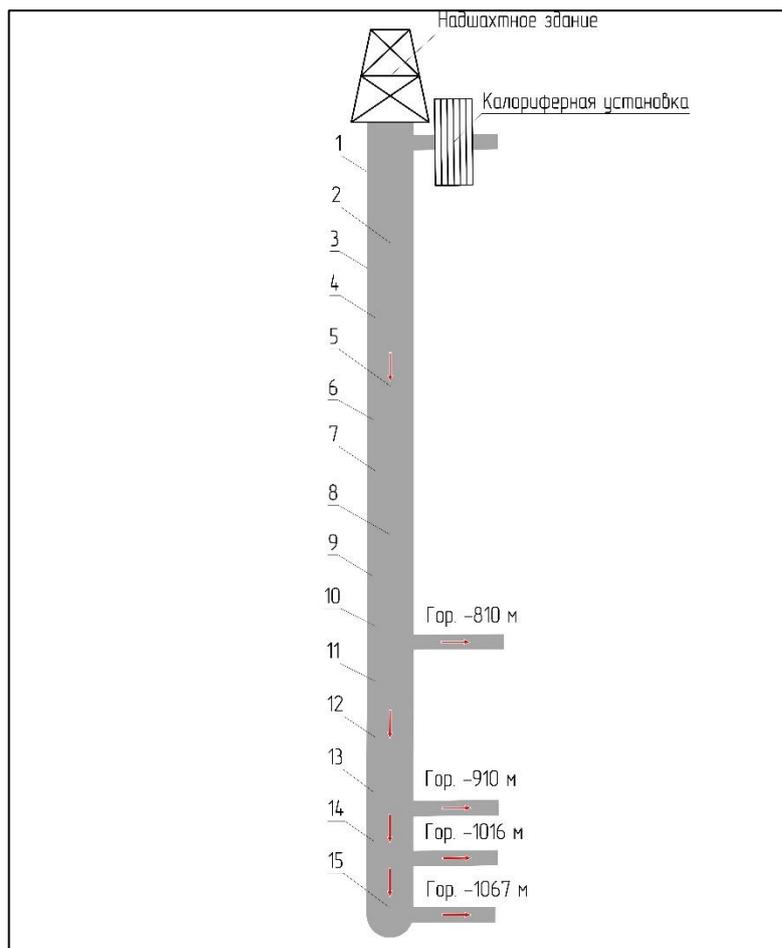


Рисунок 3.1 — Схематическое изображение мест проведения измерений в стволе КС-2 рудника «Октябрьский»

В таблицах 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 представлены результаты экспериментальных измерений температуры воздуха и их обработки по формулам (3.27), (3.28), (3.29), (3.30) по длине стволов КС-2, ГС и ВС-4 рудника «Октябрьский» в период с 2012 по 2016 годы. Определение количества измерений приведено в разделе 3.2.2.

Таблица 3.1 — Результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в стволе КС-2 рудника «Октябрьский», проведенных в августе 2012 года

Август 2012		Температура воздуха, °С										
		Номер измерений										
Место замера	Глубина ствола, м	1	2	3	4	5	6	7	T <sub>ср</sub>	σ	ΔT <sub>сл</sub>	T
1	0	10,6	10,3	10,7	10,6	10,9	10,6	10,5	10,6	0,18	0,45	10,6±0,55
2	10	9,9	10,2	10,5	10,2	10,1	10,3	10,2	10,2	0,18	0,45	10,2±0,55
3	80	9,6	9,9	9,7	9,6	10	9,7	9,4	9,7	0,20	0,49	9,7±0,59
4	180	10,4	10,5	10,3	10,1	10,3	10,8	10,4	10,4	0,22	0,53	10,4±0,63
5	280	11,1	10,6	11,1	11,4	11,1	11,3	11,1	11,1	0,25	0,62	11,1±0,72
6	380	11,4	11,7	11,8	11,8	12	11,8	12,1	11,8	0,22	0,55	11,8±0,65
7	580	13,4	13,3	13,5	12,8	13,3	13,5	13,3	13,3	0,24	0,58	13,3±0,68
8	680	14,2	14,4	14,1	14,2	14,5	13,8	14,2	14,2	0,22	0,55	14,2±0,65
9	780	14,8	15	14,4	15,2	14,8	14,6	14,8	14,8	0,26	0,63	14,8±0,73
10	810	15	15,2	15,1	15,4	15,1	15,1	14,8	15,1	0,18	0,45	15,1±0,55
11	860	14,7	15,2	14,7	14,4	14,7	14,5	14,7	14,7	0,25	0,62	14,7±0,72
12	880	15,1	15,2	15,2	14,7	15,6	15,4	15,2	15,2	0,28	0,68	15,2±0,78
13	910	16,2	15,8	16	15,7	16	16	16,3	16	0,21	0,51	16±0,61
14	1016	14,3	14,1	14,3	14,2	14,1	13,6	14,1	14,1	0,24	0,58	14,1±0,68
15	1067	16,7	16,6	16,5	17,3	16,4	16,7	16,7	16,7	0,29	0,71	16,7±0,81

Таблица 3.2 — Результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в стволе КС-2 рудника «Октябрьский», проведенных в апреле 2014 года

Апрель 2014		Температура воздуха, °С										
		Номер измерений										
Место замера	Глубина ствола, м	1	2	3	4	5	6	7	T <sub>ср</sub>	σ	ΔT <sub>сл</sub>	T
1	0	8,9	8,4	8,8	9,2	8,8	8,7	8,8	8,8	0,24	0,58	8,8±0,68
2	10	13,3	13	13,2	13	12,8	12,7	13	13	0,21	0,51	13±0,61
3	80	12,6	12,5	12,3	12,6	12,9	12,6	12,7	12,6	0,18	0,45	12,6±0,55
4	180	13,1	13,3	13,9	13,2	13,3	13	13,3	13,3	0,29	0,71	13,3±0,81
5	280	14,1	13,7	14	13,8	14	14	14,4	14	0,22	0,55	14±0,65
6	380	14,8	14,7	14,4	15	14,9	14,4	14,7	14,7	0,23	0,57	14,7±0,67
7	580	16	16,2	16,3	16,1	16,2	16	16,6	16,2	0,21	0,51	16,2±0,61
8	680	17,2	17,1	16,7	17,1	17,4	17,1	17,1	17,1	0,21	0,51	17,2±0,61
9	780	17,6	17,8	17,7	17,4	17,7	17,7	18	17,7	0,18	0,45	17,7±0,55
10	810	18	17,8	18	17,9	17,8	18,5	18	18	0,24	0,58	18±0,68
11	860	17,6	17,4	17,6	17,3	17,7	18	17,6	17,6	0,22	0,55	17,6±0,65
12	880	18,1	18,2	18,5	18,2	18,3	18,2	17,9	18,2	0,18	0,45	18,2±0,55
13	910	19,4	19,2	20	19,4	19,1	19,4	19,3	19,4	0,29	0,71	19,4±0,81
14	1016	16,8	16,9	16,6	16,8	16,7	17	16,8	16,8	0,13	0,32	16,8±0,42
15	1067	18,3	18,2	18,2	18,4	18,2	17,9	18,2	18,2	0,15	0,37	18,2±0,47

Таблица 3.3 — Результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в стволе КС-2 рудника «Октябрьский», проведенных в феврале 2016 года

Февраль 2016		Температура воздуха, °С										
		Номер измерений										
Место замера	Глубина ствола, м	1	2	3	4	5	6	7	T <sub>ср</sub>	σ	ΔT <sub>сл</sub>	T
1	0	6,5	6,4	6,7	6,3	6,5	6,6	6,5	6,5	0,13	0,32	6,5±0,42
2	10	11,5	11,6	11,5	11,9	11,4	11,5	11,8	11,6	0,18	0,45	11,6±0,55
3	80	11,1	11	11,3	11,1	11,1	10,6	11,5	11,1	0,28	0,68	11,1±0,78
4	180	11,8	11,6	11,7	11,3	11,7	12,1	11,7	11,7	0,24	0,58	11,7±0,68
5	280	12,4	12,3	12,5	12,4	12,7	12,4	12,1	12,4	0,18	0,45	12,4±0,55
6	380	12,9	13,1	13,3	12,8	13,1	13,4	13,1	13,1	0,21	0,51	13,1±0,61
7	580	14,6	14,8	14,7	14,6	14,7	14,2	14,6	14,6	0,19	0,47	14,6±0,57
8	680	15,6	15,3	15,4	15,4	15,5	15,8	15,5	15,5	0,16	0,40	15,5±0,5
9	780	16,1	16,5	16,1	15,8	16,2	16,1	15,9	16,1	0,22	0,55	16,1±0,65
10	810	16,4	16,5	16,3	16,7	16,5	16,6	16,5	16,5	0,13	0,32	16,5±0,42
11	860	16,2	16,1	15,8	16,2	16,4	16,2	16,5	16,2	0,22	0,55	16,2±0,65
12	880	16,8	16,9	16,5	17,2	16,9	17,1	16,9	16,9	0,22	0,55	16,9±0,65
13	910	17,7	17,8	17,7	18	17,7	17,7	17,3	17,7	0,21	0,51	17,7±0,61
14	1016	16,2	16,1	16,4	16,3	16,5	16,3	16,3	16,3	0,13	0,32	16,3±0,42
15	1067	18,4	18,3	18,4	18,7	18	18,6	18,4	18,4	0,22	0,55	18,4±0,65

Таблица 3.4 — Результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в стволе ГС рудника «Октябрьский», проведенных в феврале 2016 года

Февраль 2016		Температура воздуха, °С										
		Номер измерений										
Место замера	Глубина ствола, м	1	2	3	4	5	6	7	Т <sub>ср</sub>	σ	ΔТ <sub>сл</sub>	Т
1	0	7,4	7,3	7	7,3	7,6	7,2	7,3	7,3	0,18	0,45	7,3±0,55
2	10	16,5	16,2	16,4	16,5	16,9	16,6	16,4	16,5	0,22	0,53	16,5±0,63
3	80	14,3	14,1	14,2	14,2	14,1	13,7	14,1	14,1	0,19	0,47	14,1±0,57
4	180	15	14,5	14,9	15,3	14,9	14,9	14,8	14,9	0,24	0,58	14,9±0,68
5	280	15,7	15,6	15,3	15,7	16,4	15,5	15,7	15,7	0,34	0,84	15,7±0,94
6	380	16,4	16,2	16,4	16,1	16,8	16,4	16,5	16,4	0,22	0,55	16,4±0,65
7	480	16,9	17,1	16,7	17,6	17,1	17,2	17,1	17,1	0,28	0,68	16,1±0,78
8	580	17,7	17,9	17,2	17,7	18,1	17,7	17,6	17,7	0,28	0,68	17,7±0,78
9	722	18,7	18,4	18,8	19,2	18,8	18,8	18,9	18,8	0,24	0,58	18,8±0,68
10	772	18,5	18,3	18,5	18,2	19,1	18,4	18,5	18,5	0,29	0,71	18,5±0,81
11	872	17,7	17,6	17,3	17,6	17,6	17,8	17,6	17,6	0,15	0,37	17,6±0,47

Таблица 3.5 — Результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в стволе ВС-4 рудника «Октябрьский», проведенных в июне 2014 года

Июнь 2014		Температура воздуха, °С										
		Номер измерений										
Место замера	Глубина ствола, м	1	2	3	4	5	6	7	T <sub>ср</sub>	σ	ΔT <sub>сл</sub>	T
1	0	10,2	10,4	10,5	10,8	10,5	10,6	10,5	10,5	0,18	0,45	10,5±0,55
2	20	15,2	14,8	15,2	15	15,7	15,2	15,3	15,2	0,28	0,68	15,2±0,78
3	180	15,9	16,3	16,2	16,7	16,3	16,4	16,3	16,3	0,24	0,58	16,3±0,68
4	280	17	17,2	17	16,7	17,3	17	16,8	17	0,21	0,51	17±0,61
5	480	18,1	18,3	18,2	18,9	18,3	18	18,3	18,3	0,29	0,71	18,3±0,81
6	587	18,5	19,1	19	18,9	19,5	19	19	19	0,29	0,72	19±0,82
7	642	18,1	18	18,4	17,8	18	17,7	18	18	0,22	0,55	18±0,65
8	795	18,7	18,9	18,6	18,9	19,3	18,9	19	18,9	0,22	0,55	18,9±0,65
9	894	17	17,3	17,2	16,9	17,2	17,6	17,2	17,2	0,22	0,55	17,2±0,65
10	944	18,2	18,4	18,1	18,2	17,8	18,2	18,5	18,2	0,22	0,55	18,2±0,65
11	994	15,8	16	15,4	15,7	15,8	16,1	15,8	15,8	0,22	0,55	15,8±0,65
12	1043	19,8	19,5	19,2	19,6	19,5	19,5	19,4	19,5	0,18	0,45	19,5±0,55

На рисунок 3.2 нанесены результаты экспериментальных измерений температуры воздуха по длине стволов КС-2, ГС и ВС-4. Каждая из точек, расположенных на графике, представляет результат статистической обработки измерений, представленных в таблицах 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5.

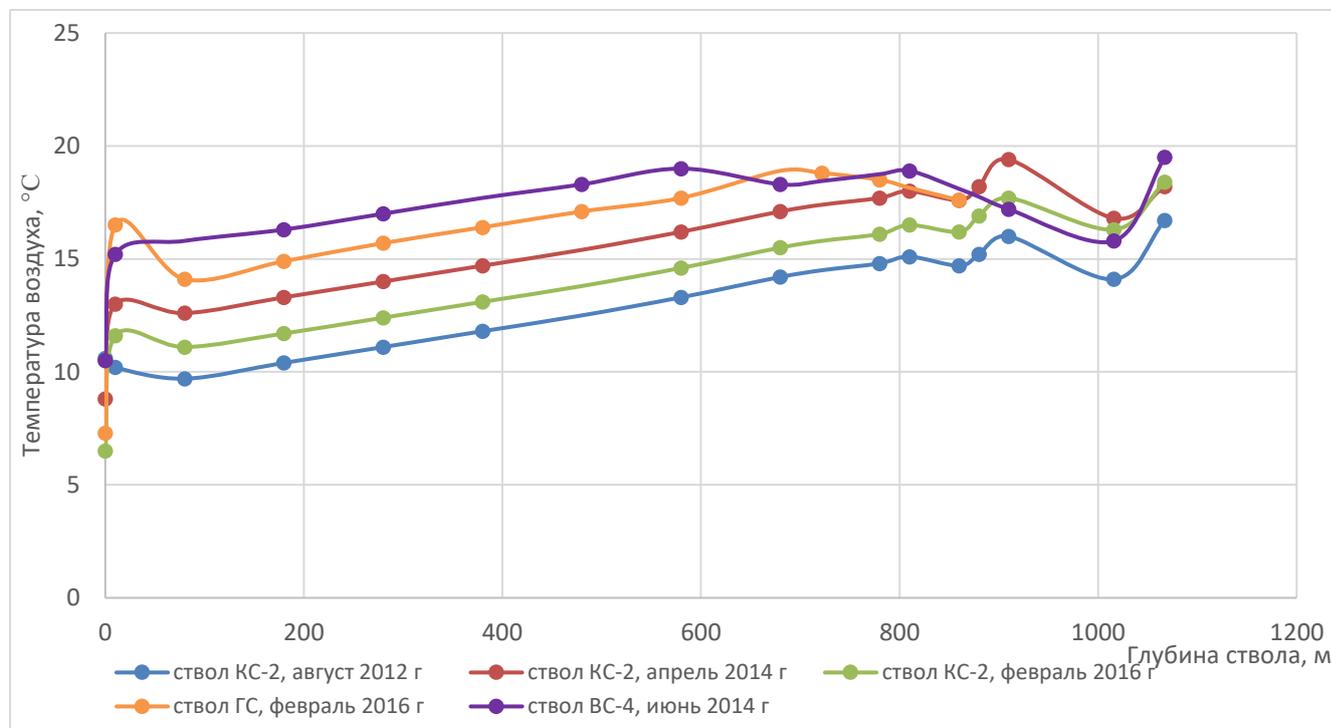


Рисунок 3.2 — Результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в стволах КС-2, ГС и ВС-4 рудника «Октябрьский»

Анализируя результаты экспериментальных измерений температуры воздуха в стволах, можно сделать вывод о том, что на начальном участке стволов КС-2 и ГС (~100 м) температура воздуха изменяется нелинейно. Кроме того, нелинейность изменений температуры наблюдаются между сопряжениями стволов с горизонтами (расстояние между сопряжениями ~ 100 метров). Графики, построенные на рисунке 3.2 по результатам проведенных экспериментальных исследований, показывают, что на протяженных прямолинейных участках стволов (длина  $\geq 200$  м) температура воздуха меняется линейно по глубине ствола.

В таблицах 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 представлены результаты экспериментальных измерений абсолютного давления воздуха и их обработки по формулам (3.27), (3.28), (3.29), (3.30) по длине стволов КС-2, ГС и ВС-4 рудника «Октябрьский» в период с 2012 по 2016 годы.

Таблица 3.6 — Результаты экспериментальных измерений абсолютного давления воздуха в стволе КС-2 рудника «Октябрьский», проведенных в августе 2012 года

Август 2012		Давление, Па										
		Номер измерений										
Место замера	Глубина ствола, м	1	2	3	4	5	6	7	Р <sub>ср</sub>	σ	ΔР <sub>сл</sub>	Р
1	0	99408	99420	99393	99408	99401	99416	99410	99408	9	22	99408±37
2	10	99500	99486	99475	99494	99486	99473	99488	99486	10	24	99486±39
3	80	100192	100182	100194	100188	100184	100224	100194	100194	14	34	100194±49
4	180	101455	101450	101460	101450	101433	101450	101452	101450	8	20	101450±35
5	280	102624	102609	102627	102624	102633	102623	102628	102624	7	18	102624±33
6	380	103791	103806	103821	103802	103806	103813	103803	103806	9	23	103806±38
7	580	106161	106153	106158	106157	106168	106151	106158	106158	6	14	106158±29
8	680	107342	107320	107313	107308	107320	107315	107322	107320	11	27	107320±42
9	780	108510	108519	108512	108510	108502	108507	108510	108510	5	13	108510±28
10	810	108915	108922	108911	108940	108922	108908	108922	108922	11	26	108922±41
11	860	109555	109536	109527	109539	109527	109536	109532	109536	10	23	109536±38
12	880	109823	109814	109823	109812	109823	109837	109829	109823	9	21	109823±37
13	910	110220	110195	110190	110184	110195	110189	110192	110195	12	29	110195±44
14	1016	111489	111502	111489	111486	111496	111489	111472	111489	9	23	111489±38
15	1067	112157	112138	112160	112165	112164	112176	112160	112160	11	28	112160±43

Таблица 3.7 — Результаты экспериментальных измерений абсолютного давления воздуха в стволе КС-2 рудника «Октябрьский», проведенных в апреле 2014 года

Апрель 2014		Давление, Па										
		Номер измерений										
Место замера	Глубина ствола, м	1	2	3	4	5	6	7	Рср	σ	ΔРсл	Р
1	0	101739	101720	101715	101721	101719	101712	101721	101721	9	21	101721±36
2	10	101804	101794	101817	101804	101802	101804	101803	101804	7	17	101804±32
3	80	102511	102512	102521	102518	102512	102507	102503	102512	6	15	102512±30
4	180	103845	103815	103818	103802	103807	103818	103821	103818	14	34	103818±49
5	280	105044	105042	105045	105056	105042	105030	105035	105042	8	20	105042±35
6	380	106274	106260	106280	106272	106274	106284	106274	106274	7	18	106274±33
7	580	108714	108726	108745	108720	108726	108723	108728	108726	10	24	108726±39
8	680	109938	109913	109942	109938	109945	109952	109938	109938	12	30	109938±45
9	780	111179	111169	111178	111176	111173	111178	111193	111178	7	18	111178±33
10	810	111581	111590	111585	111605	111590	111587	111592	111590	8	19	111590±34
11	860	112253	112242	112249	112269	112253	112250	112255	112253	8	20	112253±35
12	880	112531	112540	112538	112540	112554	112540	112537	112540	7	17	112540±32
13	910	112912	112932	112910	112901	112912	112905	112912	112912	10	24	112912±39
14	1016	114240	114229	114221	114229	114229	114228	114227	114229	6	14	114229±29
15	1067	114892	114901	114900	114888	114904	114915	114900	114900	9	21	114900±36

Таблица 3.8 — Результаты экспериментальных измерений абсолютного давления воздуха в стволе КС-2 рудника «Октябрьский», проведенных в феврале 2016 года

Февраль 2016		Давление, Па										
		Номер измерений										
Место замера	Глубина ствола, м	1	2	3	4	5	6	7	Р <sub>ср</sub>	σ	ΔР <sub>сл</sub>	Р
1	0	99020	99029	99017	99021	99011	99020	99022	99020	5	13	99020±28
2	10	99100	99098	99099	99112	99098	99083	99096	99098	8	21	99098±36
3	80	99806	99796	99800	99796	99781	99798	99795	99796	8	19	99796±34
4	180	101072	101056	101072	101079	101067	101086	101072	101072	9	23	101072±38
5	280	102292	102266	102265	102261	102249	102266	102263	102266	13	32	102266±47
6	380	103468	103457	103485	103464	103468	103468	103466	103468	8	21	103468±36
7	580	105858	105845	105860	105858	105860	105879	105860	105860	10	24	105860±39
8	680	107024	107042	107040	107041	107042	107059	107046	107042	10	25	107042±40
9	780	108252	108255	108272	108248	108252	108236	108249	108252	11	26	108252±41
10	810	108652	108664	108676	108660	108664	108667	108665	108664	7	18	108664±33
11	860	109248	109261	109260	109253	109261	109279	109265	109261	10	24	109261±39
12	880	109548	109554	109527	109548	109551	109560	109548	109548	10	25	109548±40
13	910	109912	109920	109908	109920	109922	109938	109920	109920	9	23	109920±38
14	1016	111240	111225	111240	111241	111256	111240	111238	111240	9	22	111240±37
15	1067	111869	111875	111878	111862	111877	111889	111875	111875	8	20	111875±35

Таблица 3.9 — Результаты экспериментальных измерений абсолютного давления воздуха в стволе ГС рудника «Октябрьский», проведенных в феврале 2016 года

Февраль 2016		Давление воздуха, Па										
		Номер измерений										
Место замера	Глубина ствола, м	1	2	3	4	5	6	7	Р <sub>ср</sub>	σ	ΔР <sub>сл</sub>	Р
1	0	101287	101276	101276	101264	101276	101281	101272	101276	7	17	101276±32
2	10	101352	101372	101351	101352	101345	101340	101352	101352	10	24	101352±39
3	80	102230	102255	102234	102230	102234	102218	102237	102234	11	27	102234±42
4	180	103494	103481	103505	103494	103499	103493	103492	103494	7	18	103494±33
5	280	104712	104724	104726	104738	104724	104720	104724	104724	8	19	104724±34
6	380	105914	105909	105936	105903	105914	105907	105915	105914	11	26	105914±41
7	480	107178	107194	107198	107194	107204	107196	107194	107194	8	19	107194±34
8	580	108484	108475	108485	108483	108484	108492	108485	108484	5	12	108484±27
9	722	110376	110375	110360	110375	110386	110375	110378	110375	8	19	110375±34
10	772	110937	110932	110943	110929	110932	110923	110928	110932	6	16	110932±31
11	872	112050	112042	112050	112067	112050	112043	112048	112050	8	20	112050±35

Таблица 3.10 — Результаты экспериментальных измерений абсолютного давления воздуха в стволе ВС-4 рудника «Октябрьский», проведенных в июне 2014 года

Июнь 2014		Давление воздуха, Па										
		Номер измерений										
Место замера	Глубина ствола, м	1	2	3	4	5	6	7	Р <sub>ср</sub>	σ	ΔР <sub>сл</sub>	Р
1	0	97476	97470	97481	97461	97470	97462	97470	97470	7	17	97470±32
2	20	97728	97720	97723	97743	97728	97726	97728	97728	7	18	97728±33
3	180	99831	99818	99825	99818	99806	99810	99818	99818	8	21	99818±36
4	280	101028	101044	101025	101028	101019	101023	101029	101028	8	19	101028±34
5	480	103517	103504	103502	103495	103504	103500	103506	103504	7	17	103504±32
6	587	104630	104629	104630	104621	104630	104642	104628	104630	6	15	104630±30
7	642	105343	105333	105339	105321	105333	105329	105333	105333	7	17	105333±32
8	795	107192	107206	107190	107186	107185	107190	107181	107190	8	20	107190±35
9	894	108484	108474	108477	108463	108474	108472	108474	108474	6	15	108474±30
10	944	109121	109119	109108	109119	109131	109119	109116	109119	7	17	109119±32
11	994	109750	109756	109741	109750	109752	109748	109753	109750	5	12	109750±27
12	1043	110378	110391	110390	110398	110390	110393	110390	110390	6	15	110390±30

На рисунок 3.3 нанесены результаты экспериментальных измерений абсолютного давления воздуха по длине стволов КС-2, ГС и ВС-4. Каждая из точек, расположенных на графике, представляет результат статистической обработки измерений, представленных в таблицах 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10.

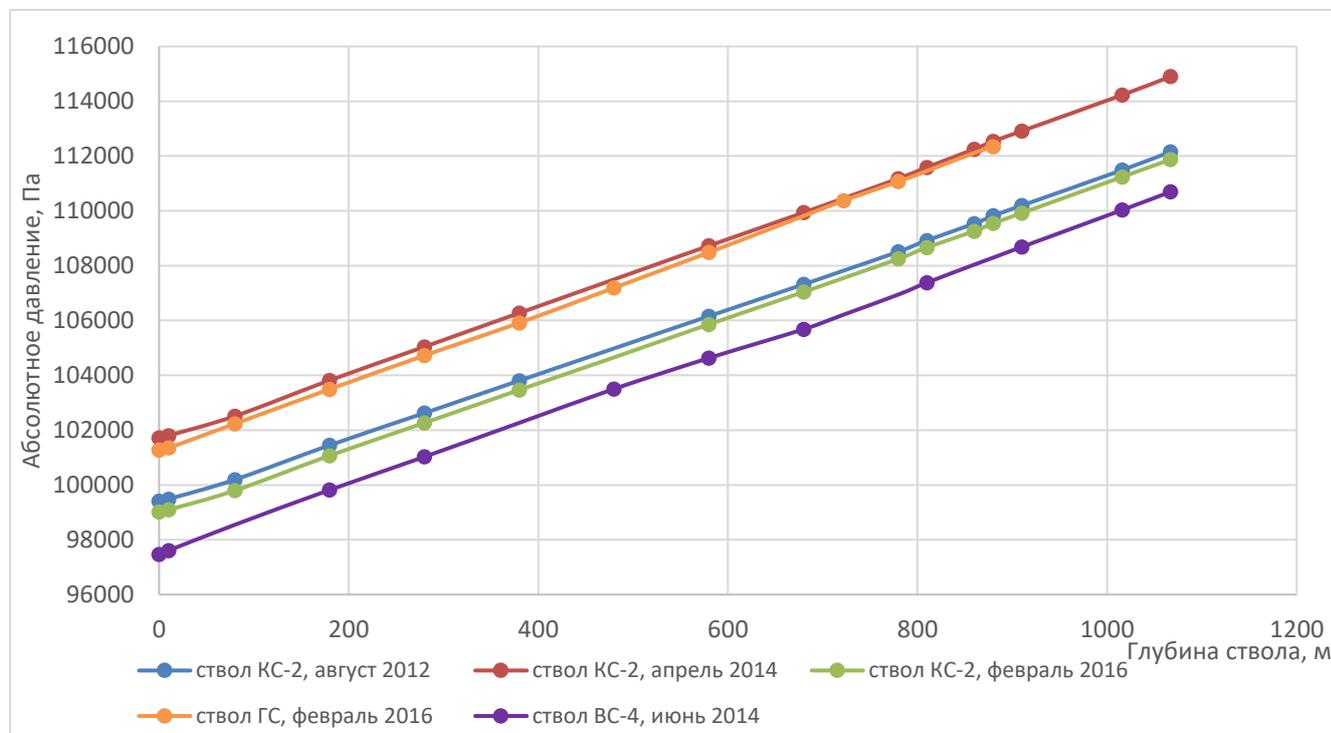


Рисунок 3.3 — Результаты экспериментальных измерений абсолютного давления воздуха в стволах КС-2, ГС и ВС-4 рудника «Октябрьский»

Экспериментальные графики, построенные на рисунке 3.3, характеризуют распределение абсолютного давления воздуха по длине стволов КС-2, ГС и ВС-4. Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать вывод, что абсолютное давление воздуха по длине ствола изменяется линейно.

Таким образом, для определения границ участков стволов, на которых следует проводить измерения термодинамических параметров воздуха, необходимо выполнить численные расчеты смешивания и разделения воздушных потоков на следующих участках стволов:

— от сопряжения ствола и калориферного канала до сопряжения ствола и горизонта;

— от сопряжения ствола с горизонтом до сопряжения ствола и вентиляционного канала.

**Участок ствола: от сопряжения ствола и калориферного канала до сопряжения ствола и горизонта**

Задача определения границ замерного участка ствола решается путем численного моделирования вариантов смешивания и разделения воздушных потоков.

Для разработки корректной модели участка ствола (сопряжение «калориферный канал – горизонт») необходимо провести предварительные измерения аэротермодинамических параметров воздуха и геометрических параметров исследуемого участка ствола.

Расчетная геометрия включает в себя трехмерную модель ствола с прилегающими калориферным каналом и участком горизонта с учетом их геометрических параметров – длин  $L_j$  (м) и площадей поперечного сечения  $S_j$  (м<sup>2</sup>). На участке входа потока в расчетную область (калориферный канал и надшахтное здание) задавались аэротермодинамические параметры воздуха: расход  $Q_j$  (м<sup>3</sup>/с) и температура  $T_j$  (°C) (рис. 3.4).

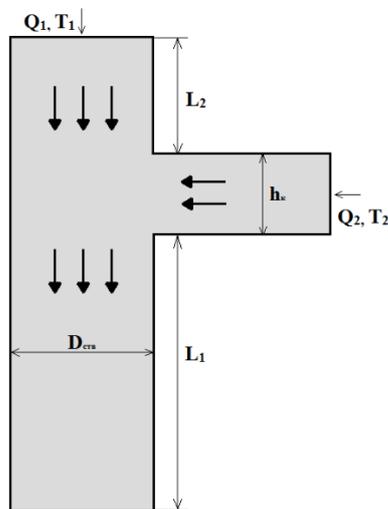


Рисунок 3.4 — Схема расчетной геометрии сопряжения калориферного канала и воздухоподающего ствола

Рассмотрены варианты расчета с учетом включенной калориферной установки ( $T \neq \text{const}$ ) и выключенной ( $T = \text{const}$ ), различных сочетаний сечений ствола и разных объемов воздуха, поступающего в ствол.

Распределения давлений и температур в сечении ствола диаметром ( $D=8$  м) представлены на рисунках 3.5 и 3.6. Графики показаны в поперечных сечениях ствола на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения калориферного канала и ствола.

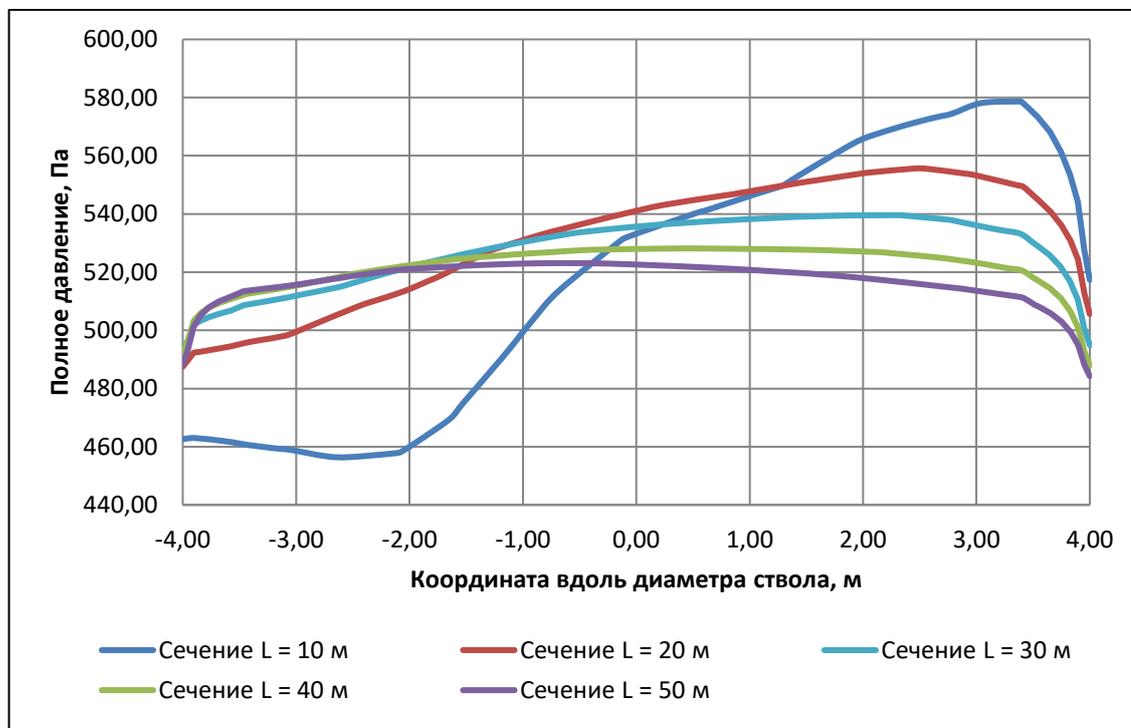


Рисунок 3.5 — Распределение давления воздуха в поперечных сечениях ствола на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения калориферного канала и ствола

Результаты численного моделирования показали, что на расстоянии 50 метров от сопряжения калориферного канала со стволом давление воздуха по сечению ствола меняется в пределах погрешности прибора измерения давления (DPI-740, абсолютная погрешность  $\pm 15$  Па).

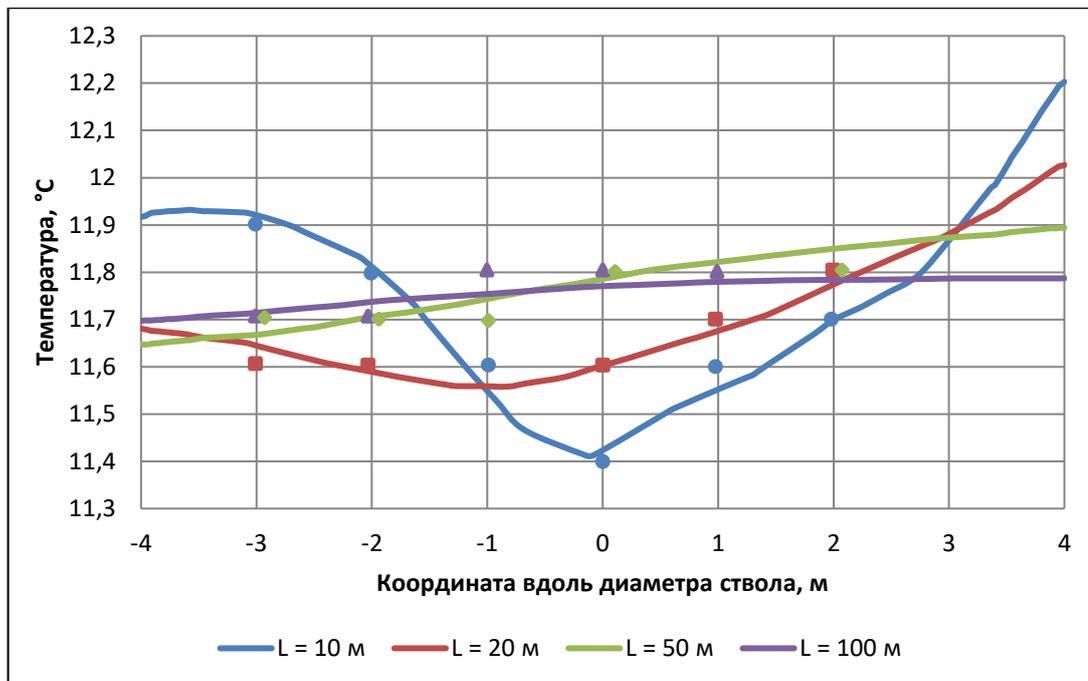


Рисунок 3.6 — Распределение температуры воздуха в поперечных сечениях ствола на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения калориферного канала и ствола

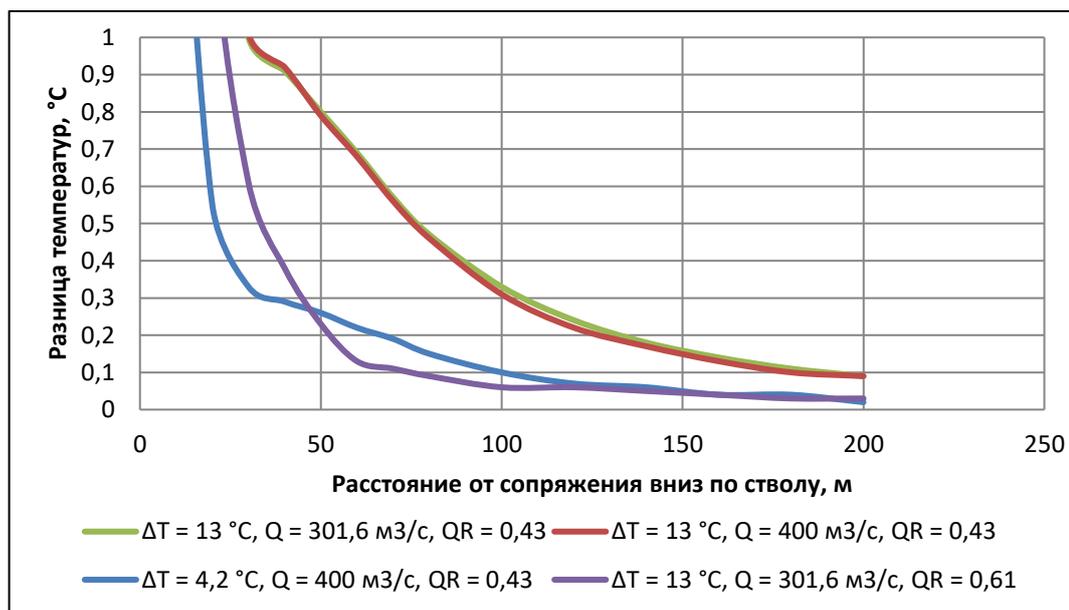


Рисунок 3.7 — Перепад температур между максимальным и минимальным значениями температуры в поперечных сечениях ствола на различных расстояниях от сопряжения калориферного канала и ствола

На рисунке 3.6 изображены графики, полученные по результатам моделирования смешивания потоков воздуха, поступающего через калориферный канал ( $Q_1$ ) с температурой ( $T_1$ ) и через надшахтное здание ( $Q_2$ ) с температурой

( $T_2$ ). Рисунок характеризует распределение температуры воздуха в поперечных сечениях ствола на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения. На рисунке 3.6 нанесены экспериментальные замеры температуры воздуха на разных отметках в поперечных сечениях ствола. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что температура воздушного потока выравнивается по сечению ствола через 100 метров после прохождения сопряжения калориферного канала со стволом.

Из полученных результатов моделирования (поля давлений и температур) можно сделать вывод, что выравнивание температуры воздуха после смешивания воздушных потоков по сечению ствола происходит значительно дольше, чем выравнивание давления. Данный факт подтверждается экспериментальными исследованиями (рисунок 3.6). Следовательно, основным критерием при определении протяженности участка, на котором происходит смешивание воздушных потоков, является температура воздуха.

Выравнивание поля температур по сечению ствола, представленное на рисунке 3.7, анализировалось по критерию

$$K = |T_{\max} - T_{\min}|, \quad (3.1)$$

где  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  – соответственно максимальная и минимальная температуры воздуха в рассматриваемом поперечном сечении ствола, °С.

По результатам проведенных расчетов определена математическая зависимость определения длины начального участка от аэро- и термодинамических параметров воздуха, поступающего из калориферного канала и надшахтного здания, а также от величины диаметра ствола.

В ходе проведения исследований установлено, что при измерении аэро- и термодинамических параметров  $Q_j$  и  $T_i$  струй воздуха на входе в расчетную область, расстояние от сопряжения калориферного канала со стволом, на котором разница температур будет менее  $0.1^\circ\text{C}$  (погрешность измерительного оборудования  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , психрометр аспирационный МВ-4-2М), может быть оценено с помощью формулы:

$$L_r = 8.2 \cdot D \cdot |T_1 - T_2| \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{(Q_1 + Q_2)^2}, \quad (3.2)$$

где  $D$  – диаметр ствола, м;  $T_1$  – температура струи воздуха, поступающей из надшахтного здания, °C;  $T_2$  – температура струи воздуха, поступающей из калориферного канала, °C;  $Q_1$  – количество воздуха, поступающего из надшахтного здания, м<sup>3</sup>/с;  $Q_2$  – количество воздуха, поступающего из калориферного канала, м<sup>3</sup>/с.

Конечная точка исследуемого участка ствола определена по результатам численного моделирования участка ствола и сопряжения с горизонтом (рис. 3.8).

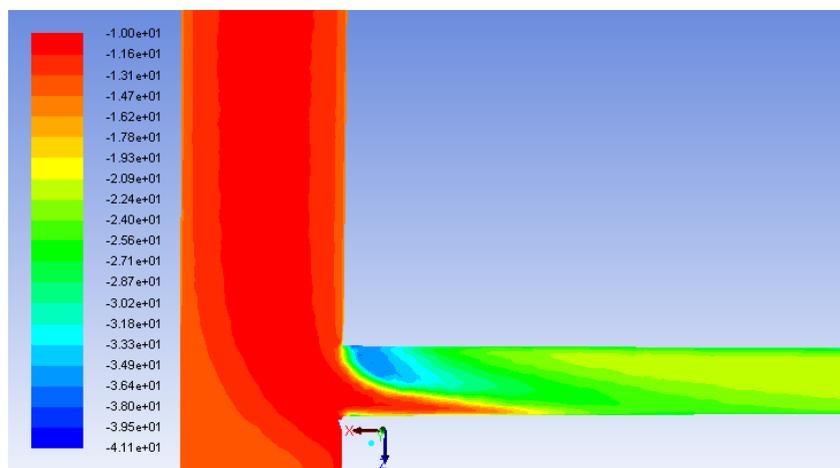


Рисунок 3.8 — Распределение полного давления на участке воздухоподающего ствола и сопряжения с горизонтом

На основании выполненного расчета можно сделать вывод, что замеры нужно производить непосредственно перед сопряжением ствола с горизонтом.

***Участок ствола: от сопряжения ствола и горизонта до сопряжения ствола и вентиляционного канала***

Определение границ замерного участка вентиляционного ствола (сопряжение «горизонт – вентиляционный канал») производилось путем разработки расчетной модели и дальнейшего численного моделирования различных вариантов.

Расчетная модель включает в себя трехмерную модель ствола с прилегающими вентиляционным каналом и участком горизонта с учетом их

геометрических параметров – длин  $L_j$  (м) и площадей поперечного сечения  $S_j$  (м<sup>2</sup>). На участке входа потока в расчетную область (сопряжение «вентиляционный ствол – горизонт») задавались аэротермодинамические параметры воздуха: расход  $Q_j$  (м<sup>3</sup>/с) и температура  $T_i$  (°C) (рис. 3.9).

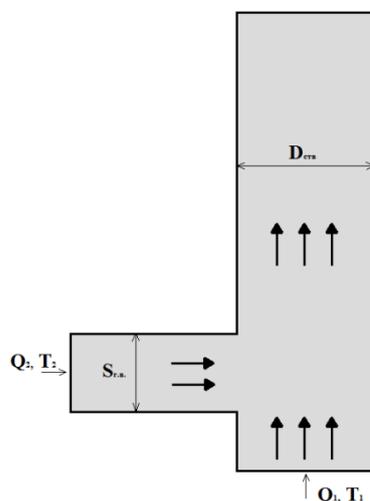


Рисунок 3.9 — Схема расчетной геометрии вентиляционного ствола и участка горизонта

Рассмотрены варианты расчета с учетом различных температур и объемов воздуха, поступающего с разных горизонтов в ствол.

По результатам моделирования определены распределения давлений (рис. 3.10) и температур (рис. 3.11) воздуха в поперечных сечениях ствола ( $D=6,5$  м) на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения вентиляционного ствола с горизонтом в направлении поверхности.

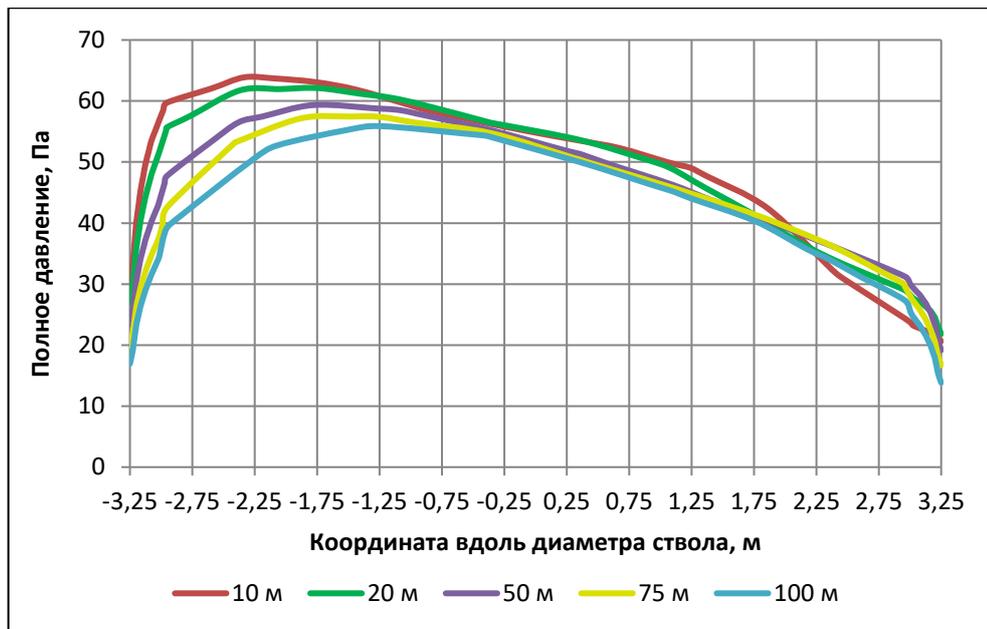


Рисунок 3.10 — Распределение давлений воздуха в поперечных сечениях ствола (после смешивания воздушных потоков) на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения вентиляционного ствола с горизонтом в направлении поверхности

По результатам выполненного расчета можно сделать вывод, что на расстоянии 50 метров от сопряжения вентиляционного ствола с горизонтом в направлении поверхности давление воздуха по сечению ствола меняется в пределах погрешности прибора измерения давления (DPI-740, абсолютная погрешность  $\pm 15$  Па).

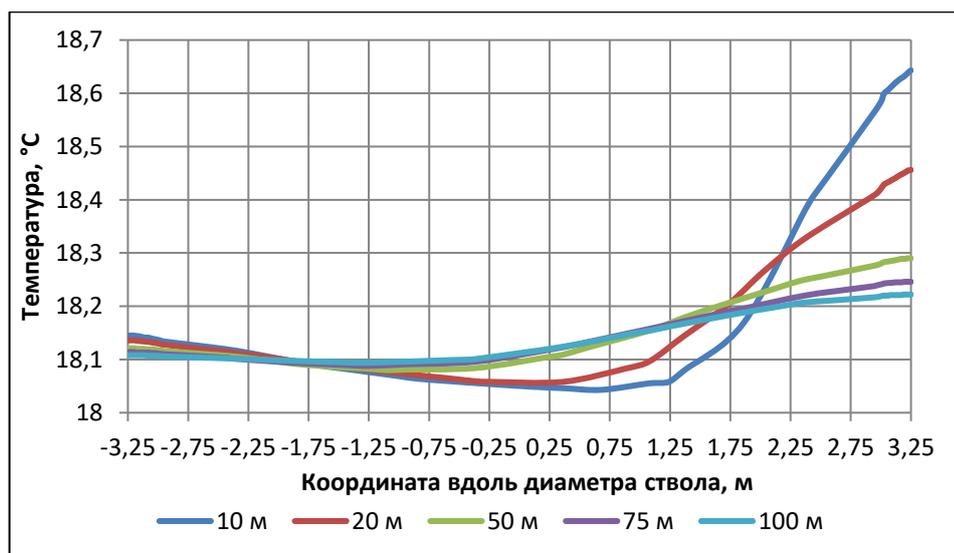


Рисунок 3.11 — Распределение температур воздуха в поперечных сечениях ствола (после смешивания воздушных потоков) на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения вентиляционного ствола с горизонтом в направлении поверхности

На рисунке 3.11 изображены графики, полученные по результатам моделирования смешивания потоков воздуха, поступающего с верхнего горизонта в ствол ( $Q_1$ ) с температурой ( $T_1$ ), и воздуха, поступающего со всех нижележащих горизонтов в стволе ( $Q_2$ ) с температурой ( $T_2$ ). Рисунок характеризует распределение температур воздуха в поперечных сечениях ствола (после смешивания воздушных потоков) на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения. По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод, что температура воздушного потока выравнивается по сечению ствола через 75 метров после сопряжения вентиляционного ствола с горизонтом в направлении поверхности.

Конечная точка замерного участка ствола определена по результатам численного моделирования смешивания воздушного потока на участках ствола в районе сопряжения ствола с вентиляционным каналом (рис. 3.12, 3.13, 3.14).

Расчетная геометрия включает в себя трехмерную модель ствола со стороны поверхности и подземной части с прилегающим вентиляционным каналом с учетом их геометрических параметров – длин  $L_j$  (м) и площадей поперечного сечения  $S_j$  (м<sup>2</sup>). На участке входа потока в расчетную область (вентиляционный ствол со стороны поверхности и подземной части) задавались аэротермодинамические параметры воздуха: расход  $Q_j$  (м<sup>3</sup>/с) и температура  $T_i$  (°C) (рис. 3.12).

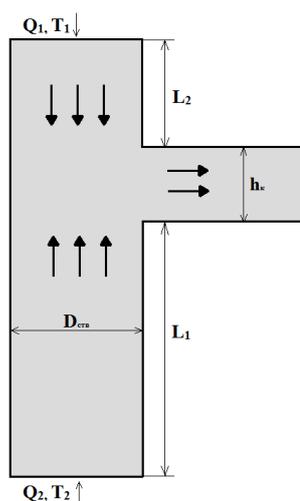


Рисунок 3.12 — Схема расчетной геометрии сопряжения вентиляционного канала и вентиляционного ствола

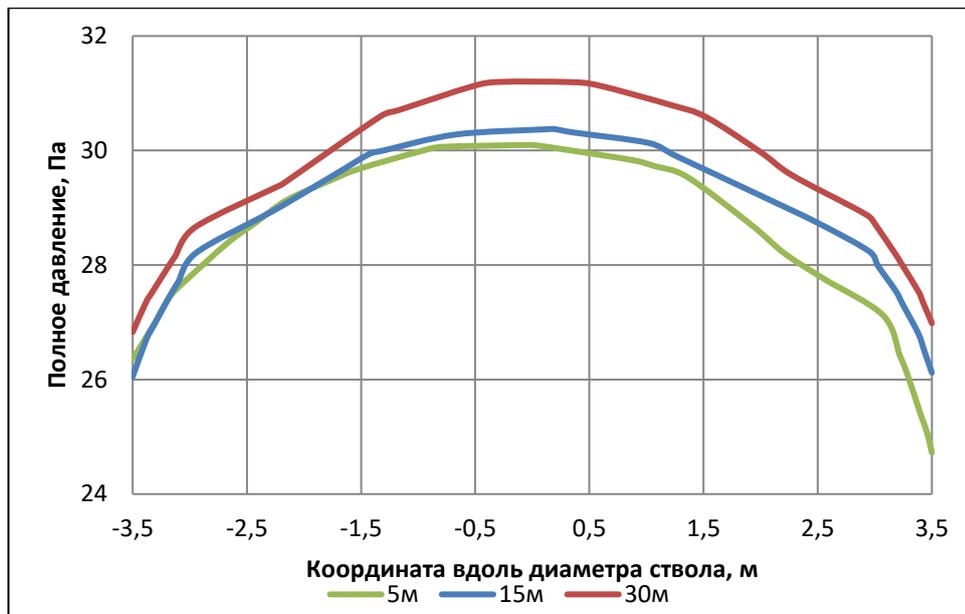


Рисунок 3.13 — Распределение значений полного давления на участке вентиляционного ствола и сопряжения с вентиляционным каналом

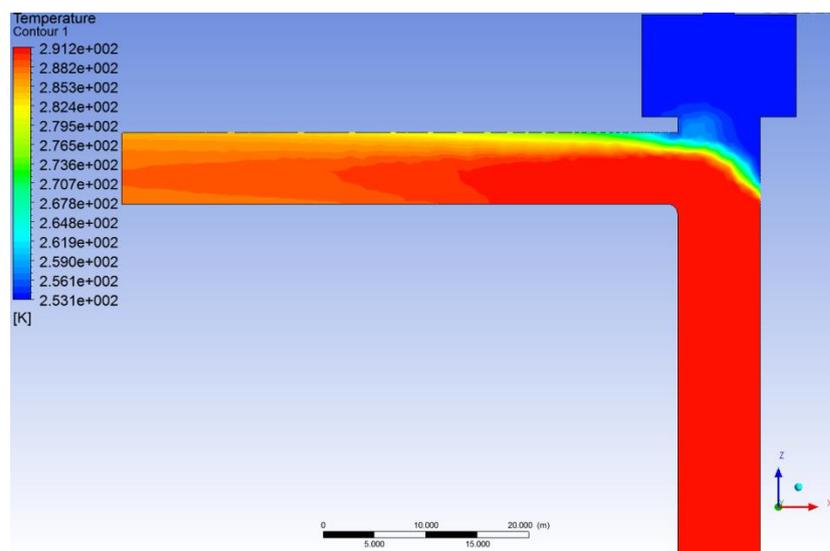


Рисунок 3.14 — Распределение значений температуры воздуха в поперечных сечениях ствола после смешивания воздушных потоков

По результатам выполненных расчетов можно сделать вывод, что замеры термодинамических параметров ( $P$ ,  $T$ ,  $\varphi$ ) можно производить в сечении ствола перед сопряжением с вентиляционным каналом. Однако для повышения безопасности условий выполнения экспериментов (из-за высоких скоростей движения воздуха в вентиляционном канале) рекомендуется проведение замеров на 10 метров ниже сопряжения ствола с вентиляционным каналом.

### 3.1.2 Определение количества замеров в пределах границ участка ствола

Проведенные численные расчеты подтверждены экспериментальными исследованиями (раздел 3.1.1) и позволяют точно определить границы исследуемого участка шахтного ствола. Для определения аэродинамического сопротивления исследуемого участка ствола необходимо определить количество воздуха, проходящего по стволу, и депрессию этого участка.

$$\Delta R = \frac{\Delta P}{Q_{ств}^2}, \quad (3.3)$$

где  $\Delta P$  – депрессия исследуемого участка ствола, Па;  $Q_{ств}$  – количество воздуха, проходящего по стволу, м<sup>3</sup>/с.

Количество воздуха, проходящего по стволу, определяется путем замеров площади поперечного сечения выработок, соединяющихся со стволом на протяжении всей его длины, и скорости воздуха в этих выработках.

$$Q_{ств} = \sum_{j=1}^n v_j \cdot S_j, \quad (3.4)$$

где  $v_j$  – скорость движения воздуха в  $j$ -ой выработке, м/с;  $S_j$  – площадь поперечного сечения  $j$ -ой выработки, м<sup>2</sup>;  $n$  – количество замеряемых выработок.

Депрессия исследуемого участка ствола «1- $m$ » (точка «1» выше точки « $m$ », направление движения воздуха зависит от назначения ствола) определяется с учетом процедуры приведения замеренных значений абсолютных давлений к одному уровню и одному времени:

$$\Delta P = \sum_{i=2}^m (P_{i-1} - (P_i - \rho_{cp.(i-1)-(i)} \cdot g \cdot \Delta h \pm \Delta P_{Атм})), \quad (3.5)$$

где  $P_{i-1}$  – абсолютное давление, замеренное в точке  $i-1$ , Па;  $P_i$  – абсолютное давление, замеренное в точке  $i$ , Па;  $m$  – нижняя граница исследуемого участка ствола;  $\rho_{cp.(i-1)-(i)}$  – средняя плотность воздуха на исследуемом участке ствола ( $(i-1)$ - $(i)$ ), кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\Delta h = h_i - h_{i-1}$  – глубина участка, м ( $h_i$  и  $h_{i-1}$  – высотные отметки замерных точек,  $i$  и  $i-1$  соответственно);  $\pm \Delta P_{Атм}$  –

изменение атмосферного давления, Па (знак «+» – атмосферное давление возросло, знак «-» – атмосферное давление снизилось).

Значение плотности воздуха определяется из уравнения его термодинамического состояния:

$$\rho = \rho(P, T, \xi), \quad (3.6)$$

где  $P$  – абсолютное давление воздуха, Па;  $T$  – температура воздуха, °С;  $\xi$  – абсолютная влажность воздуха, г/м<sup>3</sup>.

Входящие в уравнение (3.6) параметры являются измеряемыми величинами, которые определяются в точках «1» и «i», но не между ними, поэтому и  $\rho$  оказывается известной величиной лишь в этих точках. Давление, температура и влажность воздуха с глубиной изменяются, поэтому плотность воздуха в замерных точках разная и также меняется с глубиной.

Для определения средней плотности воздуха на исследуемом участке «1-i» воспользуемся способом линейного усреднения:

$$\rho_{cp.(1-i)} = \frac{\rho_1 + \rho_i}{2}. \quad (3.7)$$

Исследуемый участок ствола «1-i» делится на несколько одинаковых частей для проведения экспериментальных замеров термодинамических параметров воздуха (давления, температуры и влажности). Чем больше замерных точек и меньше расстояние между ними, тем меньше будет погрешность при линейном усреднении. Определение количества замерных точек является следующей задачей разработки методики определения аэродинамических сопротивлений стволов.

Для проведения уточненного усреднения плотности воздуха между замерными точками без проведения дополнительных промежуточных замеров необходимо выяснить, как реально меняется  $\rho$  на исследуемом участке. Плотность меняется под действием следующих факторов: сжатие воздуха под действием собственного веса; разрежение воздуха депрессией главного вентилятора и других источников тяги, включая естественную тягу; температурное изменение плотности в результате теплообмена с крепью, гидростатического сжатия воздуха

и процессов испарения-конденсации, если они есть; изменение влагосодержания. Каждый из этих перечисленных факторов может как значительно влиять на плотность воздуха, так и быть несущественным на фоне остальных. Выяснить это можно на основании сравнительного анализа результатов численного моделирования вертикальной стратификации плотности воздуха, рассчитанной с учетом каждого из факторов в отдельности и совместно [25].

Таким образом, уточнение методики определения аэродинамического сопротивления участка ствола между двумя замерными точками будет заключаться в варьировании величины  $\Delta R$  с пересчетом нелинейного вертикального поля абсолютного давления воздуха с учетом всех перечисленных факторов до прохождения графика  $P(h)$  через замеренные давления  $P_{i-1}$  и  $P_i$ . Одновременно с варьированием  $\Delta R$  подбирается и величина эквивалентного источника тяги, обеспечивающего замеренный расход [25].

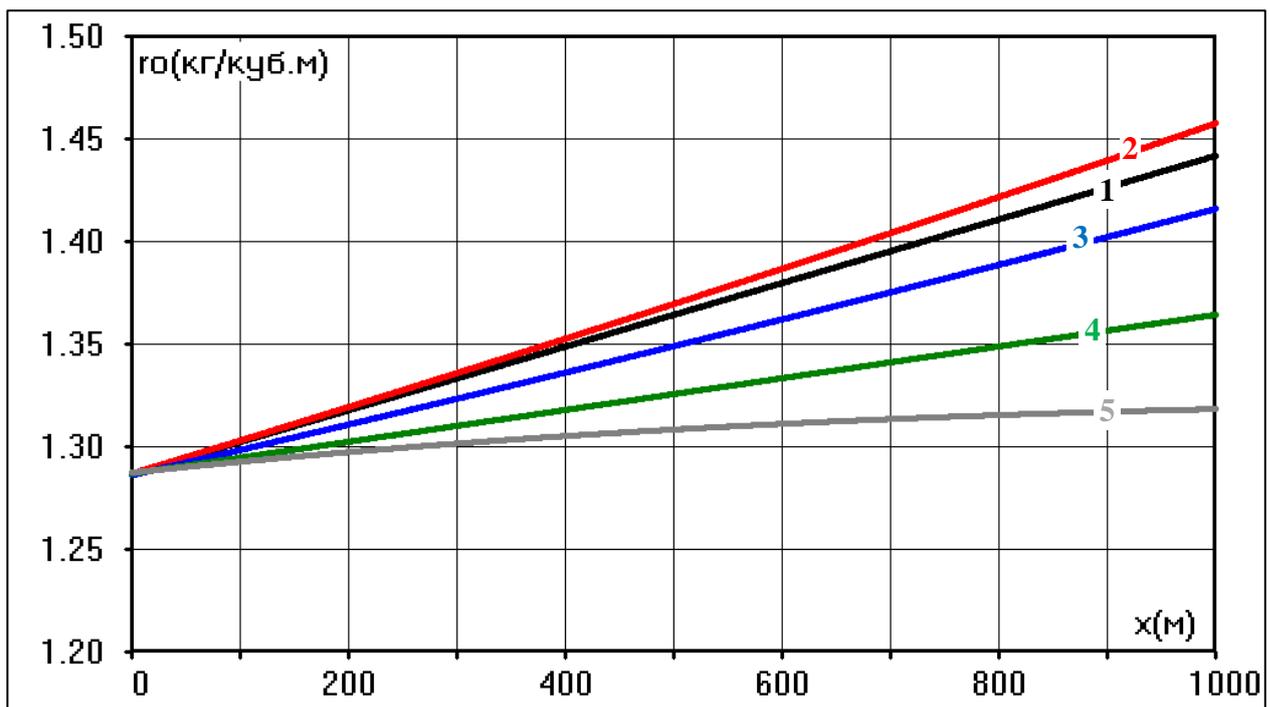


Рисунок 3.15 — Расчётные значения изменения плотности воздуха  $\rho$  по глубине воздухоподающего ствола с учётом различных факторов: 1) –  $\rho$  рассчитывается из (уравнения 3.6) в предположении постоянства  $\rho$  при вычислении роста давления  $P$  с глубиной; 2) – учитывается гравитационное сжатие; 3) – учитываются гравитационное сжатие и депрессионное разрежение; 4) – 2+3+гидростатический разогрев воздуха; 5) – 2+3+4+теплообмен воздуха с крепью ствола.

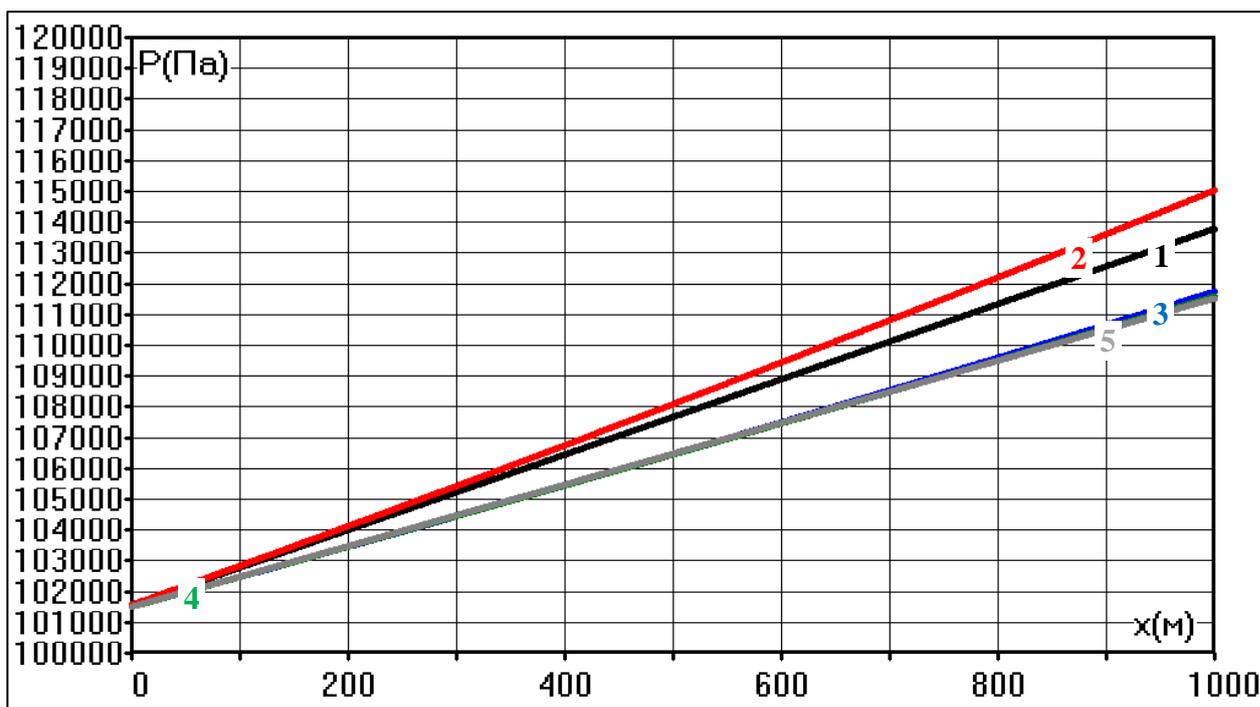


Рисунок 3.16 — Расчётные значения изменения абсолютного давления воздуха  $P$  по глубине воздухоподающего ствола с учётом различных факторов: 1) – рост  $P$  с глубиной рассчитывается в предположении постоянства  $\rho$ ; 2) – учитывается гравитационное сжатие воздуха; 3) – учитываются гравитационное сжатие и депрессионное разрежение воздуха; 4) – 2+3+гидростатический разогрев воздуха; 5) – 2+3+4+теплообмен воздуха с крепью ствола.

На рисунке 3.15 представлены расчетные результаты моделирования изменения плотности воздуха по глубине воздухоподающего ствола КС-2 рудника «Октябрьский» от устья до первого горизонта с учетом различных факторов. В соответствии с расчетными результатами зависимость плотности воздуха от содержания влаги в нем несущественна и может не учитываться. Влияние на изменение плотности остальных факторов значимо и составляет согласно рисунку до 10 %  $\rho$  на километровой глубине.

Проанализировав зависимости на рисунке 3.15 можно сделать вывод, что отклонение графика плотности воздуха от линейного на километровом участке составляет  $\sim 0,005$  кг/м<sup>3</sup> или 0,3 % среднего значения плотности. Это означает, что проведение замеров в крайних точках исследуемого участка даст достоверные результаты. Линейную интерполяцию параметров между этими точками уточнять смысла не имеет, и для вычисления сопротивления ствола следует использовать линейное усреднение (уравнение 3.7).

Аналогичный вывод можно сделать и относительно поля абсолютных давлений по глубине ствола (рис. 3.16). В отличие от плотности тепловые эффекты (гидростатический разогрев и теплообмен) на стратификацию давления практически не влияют, поэтому определяется она лишь гравитационным и депрессионным факторами. Нелинейность графиков выражена еще слабее и может быть заменена линейным усреднением.

В таблице 3.11 приведены рассчитанные по экспериментальным данным значения плотности воздуха для ствола КС-2 рудника «Октябрьский» в период с 2012 по 2016 годы.

Таблица 3.11 — Результаты расчета плотности воздуха в стволе КС-2 рудника «Октябрьский» в период с 2012 по 2016 годы

Место замера, №	Высотная отметка в стволе, м	Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>		
		Август 2012 г.	Апрель 2014 г.	Февраль 2016 г.
1	80	1,235	1,251	1,224
2	180	1,247	1,263	1,237
3	280	1,259	1,275	1,249
4	380	1,27	1,287	1,26
5	580	1,292	1,31	1,282
6	680	1,302	1,32	1,293
7	780	1,314	1,332	1,304

Графики, построенные на рисунке 3.17, характеризуют результаты расчета плотности воздуха в стволе по данным экспериментальных исследований. Данные графики построены в пределах измеряемого участка ствола между начальной и конечной точками (определяемыми численным способом в разделе 3.1.1).

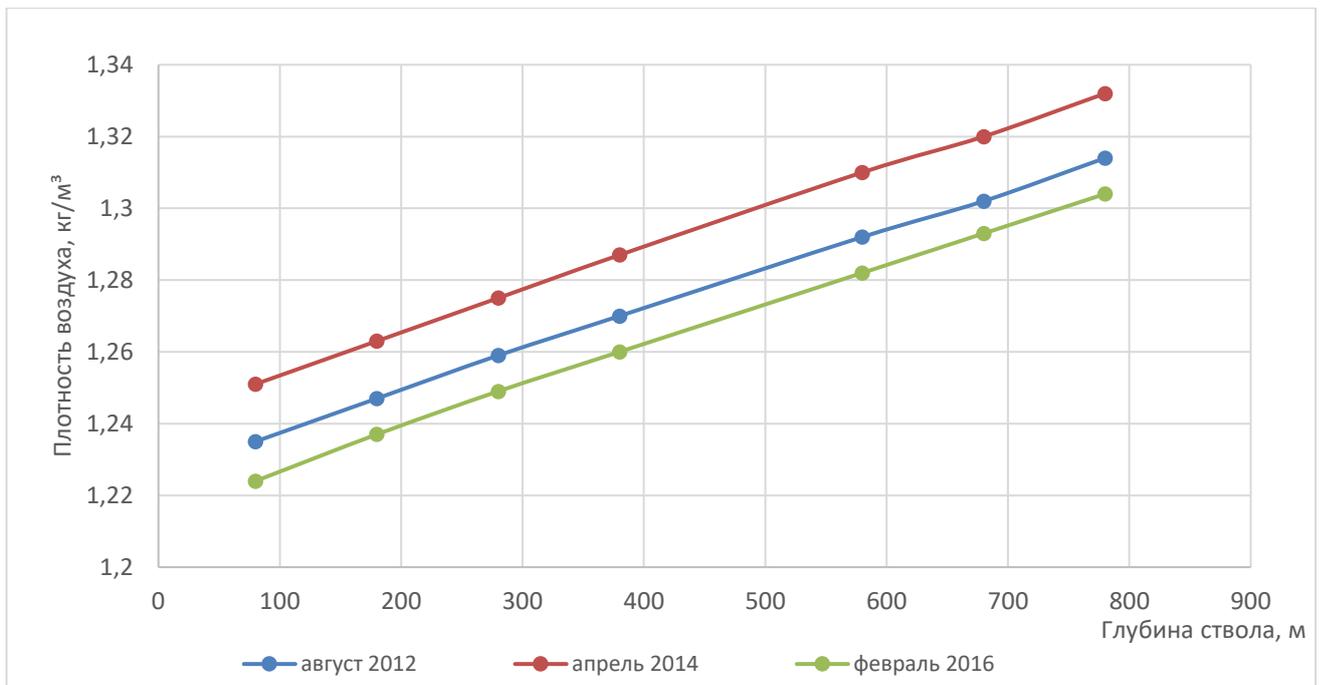


Рисунок 3.17 — Результаты расчета плотности воздуха в стволе КС-2 рудника «Октябрьский» в период с 2012 по 2016 годы в пределах измеряемого участка ствола между начальной и конечной точками

Экспериментальные исследования, проведенные в условиях стволов рудников ПАО «ГМК «Норильского Никеля», подтверждают линейное изменение параметров плотности воздуха и давления в пределах измеряемого участка.

### 3.1.3 Факторы, влияющие на определение аэродинамического сопротивления шахтных стволов

Определение аэродинамического сопротивления стволов является важнейшей задачей при проектировании вентиляции рудников. В условиях рудников и шахт падение давления на стволах достигает ~70 % от депрессии, создаваемой главной вентиляторной установкой. В связи с этим задача точного определения аэродинамических сопротивлений стволов становится наиболее актуальной.

Поскольку аэродинамическое сопротивление ствола  $R$  (кмюрг) зависит от геометрических параметров ствола  $L$  (м) и  $S$  (м<sup>2</sup>) и коэффициента аэродинамического сопротивления  $\alpha$  (кг·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>)

$$R = R(L, S, \alpha), \quad (3.8)$$

то нестационарность рудничной вентиляционной сети не влияет на общее значение сопротивления.

Многообразие вариантов армирования стволов не позволяет с необходимой точностью классифицировать стволы по аэродинамическим сопротивлениям.

Аэродинамические сопротивления необходимо определять индивидуально для каждого ствола на основании экспериментальных замеров (3.9).

$$R = \frac{h}{Q^2}, \quad (3.9)$$

где  $h$  – потеря давления на стволе, Па;  $Q$  – количество воздуха, проходящего по стволу.

Вопросу определения аэродинамического сопротивления шахтных стволов посвящено большое количество исследований [10,28,37,61,75,78], однако ни в одном из них не приводится анализ возможной погрешности.

Ошибка в определении падения давления и количества воздуха в стволе напрямую влияет на аэродинамическое сопротивление. Т.к.  $R = R(h, Q)$ , тогда

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial h} \cdot \Delta h + \frac{\partial R}{\partial Q} \cdot \Delta Q, \quad (3.10)$$

где  $\Delta R$  – абсолютная погрешность определения аэродинамического сопротивления, кмюрг;  $\Delta h$  – абсолютная погрешность определения падения давления, Па;  $\Delta Q$  – абсолютная погрешность определения количества воздуха, м<sup>3</sup>/с.

Пользуясь уравнением (3.9) можно определить  $\frac{\partial R}{\partial h}$ ,  $\frac{\partial R}{\partial Q}$ :

$$\frac{\partial R}{\partial h} = \frac{1}{Q^2}, \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial R}{\partial Q} = -\frac{2 \cdot h}{Q^3}. \quad (3.12)$$

Подставив в уравнение (3.10) зависимости (3.11) и (3.12), получим:

$$\Delta R = \frac{\Delta h}{Q^2} - \frac{2 \cdot h \cdot \Delta Q}{Q^3}. \quad (3.13)$$

Подставим уравнение (3.9) в (3.13):

$$\Delta R = \frac{R \cdot \Delta h}{h} - \frac{2 \cdot R \cdot \Delta Q}{Q}. \quad (3.14)$$

Разделим обе части уравнения (3.14) на  $R$ , тогда:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta h}{h} - \frac{2 \cdot \Delta Q}{Q}. \quad (3.15)$$

По результатам проведенных вычислений получим:

$$\varepsilon_R = \varepsilon_h - 2 \cdot \varepsilon_Q. \quad (3.16)$$

Уравнение (3.16) позволяет рассчитать относительную погрешность при определении аэродинамического сопротивления ствола в зависимости от относительных погрешностей определения депрессии и количества воздуха исследуемого ствола.

Количество воздуха, протекающее по стволу, определялось традиционным способом — путем замера скорости воздуха и площади поперечного сечения в сопряженных со стволом выработках. Для определения падения давления [80] применены современные подходы, заключающиеся в использовании прецизионных приборов. К преимуществам способа можно отнести:

- высокую точность измерения;
- возможность проведения замеров за короткое время;
- отсутствие подготовительно-заключительных операций;
- неограниченное применение способа.

Из недостатков можно отметить необходимость учета поправок, приведенных в уравнении (3.17). Применение поправок влияет на точность определения падения давления на участке ствола.

$$h = P_1 - (P_2 \pm \Delta P_{Атм} - \rho_{ср} \cdot g \cdot L), \quad (3.17)$$

где  $P_1$  — абсолютное давление в начальной точке измеряемого участка ствола, Па;  $P_2$  — абсолютное давление в конечной точке измеряемого участка ствола, Па;  $\pm \Delta P_{Атм}$  — изменение атмосферного давления, Па (знак «+» - атмосферное давление возросло, знак «-» - атмосферное давление снизилось);  $\rho_{ср}$  — средняя плотность

воздуха на участке ствола «1-2», кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – протяженность исследуемого участка ствола, м.

Входящее в уравнение (3.17)  $\Delta P_{Атм}$  характеризует изменение атмосферного давления в период проведения экспериментальных исследований. Для определения  $\Delta P_{Атм}$  на поверхности устанавливается стационарная «метеостанция», в состав которой входит компьютер и микробарометр DPI-740 (фирма Druck GF, Великобритания) со специальным программным обеспечением. В ходе проведения экспериментальных замеров микробарометр, подключенный к компьютеру, фиксирует значения атмосферного давления через заданный интервал времени. Многочисленные экспериментальные замеры показали, что такая поправка необходима. Это связано в первую очередь с возможными значительными изменениями атмосферного давления, которые могут достигать до 500 Па за 2 часа.

В уравнении (3.17) также учитывается фактор гидростатического сжатия воздуха (слагаемое « $\rho_{cp} \cdot g \cdot L$ ») с опусканием его на глубину. В этом слагаемом переменным значением является плотность воздуха [12], которая определяется:

$$\rho = \frac{29 \cdot P - 0.11 \cdot \xi \cdot (479 + (11.52 + 1.62 \cdot T)^2)}{8314 \cdot (T + 273)}, \quad (3.18)$$

$$\rho_{cp} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}, \quad (3.19)$$

где  $P$  – абсолютное давление воздуха, Па;  $T$  – температура воздуха, °С;  $\xi$  – относительная влажность воздуха, %.

Точность определения перепада давлений в шахтных стволах напрямую зависит от определенного значения плотности воздуха. Отклонение средней плотности воздуха на 0,01 кг/м<sup>3</sup> в стволе длиной 1000 м, приведет к изменению падения давления на 98 Па. Для стволов, депрессия которых ~400÷500 Па, погрешность составляет 20÷25 %. Это приводит к созданию искаженной математической модели вентиляционной сети рудника и дальнейшей неточности в расчете.

В результате проведения исследования определено влияние абсолютной приборной погрешности на общее значение плотности воздуха. Т.к.  $\rho = \rho(P, T, \xi)$ , тогда:

$$\Delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial P} \cdot \Delta P + \frac{\partial\rho}{\partial T} \cdot \Delta T + \frac{\partial\rho}{\partial \xi} \cdot \Delta \xi, \quad (3.20)$$

где  $\Delta P$  – абсолютная погрешность определения давления микробарометром DPI-740,  $\pm 15$  Па;  $\Delta T$  – абсолютная погрешность определения температуры термовлагомером Fluke-971,  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ;  $\Delta \xi$  – абсолютная погрешность определения относительной влажности термовлагомером Fluke-971,  $\pm 2,5\%$ .

Исходя из уравнения (3.18) можно определить  $\frac{\partial\rho}{\partial P}$ ,  $\frac{\partial\rho}{\partial T}$ ,  $\frac{\partial\rho}{\partial \xi}$ :

$$\frac{\partial\rho}{\partial P} = \frac{29}{8314 \cdot (T + 273)}, \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial T} = -\frac{0.22 \cdot \xi \cdot (11.52 + 1.62 \cdot T)}{8314 \cdot (T + 273)} + \frac{0.11 \cdot \xi \cdot (479 + (11.52 + 1.62 \cdot T)^2)}{8314 \cdot (T + 273)^2}, \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial \xi} = \frac{0.11 \cdot (479 + (11.52 + 1.62 \cdot T)^2)}{8314 \cdot (T + 273)}. \quad (3.23)$$

Подставив в уравнения (3.21), (3.22), (3.23) максимально возможные значения температуры  $T_{max}$  ( $^\circ\text{C}$ ) (согласно п. 156 ФНИП [86] температура воздуха в действующих горных выработках не должна превышать  $+26^\circ\text{C}$ ) и относительной влажности  $\xi$  (%) (не регламентируется, поэтому принимаем 100 %) в шахтных стволах, получим максимально возможную абсолютную погрешность плотности воздуха  $\Delta\rho_{max}$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

В итоге  $\Delta\rho_{max} = 7,59 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Определим относительную погрешность:

при  $\rho = 1,2 \div 1,4 \text{ кг}/\text{м}^3$ , а  $\Delta\rho_{max} = 7,59 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/\text{м}^3$ ; тогда

$$\delta\rho_{max} = \frac{\Delta\rho_{max}}{\rho} = 0.06\%. \quad (3.24)$$

Результаты исследований показали, что при определении плотности воздуха погрешностью прецизионных приборов можно пренебречь.

## **3.2 Методика определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов**

### **3.2.1 Планирование эксперимента**

Цель исследований – разработать методику экспериментального определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов для моделирования воздухораспределения на проектируемых рудниках, а также для получения количественной оценки возможного увеличения количества воздуха в руднике за счет проведения дополнительного ствола.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- организовать и провести экспериментальные исследования;
- рассчитать аэродинамические параметры (депрессию, количество воздуха, аэродинамическое сопротивление и коэффициент аэродинамического сопротивления) шахтных стволов.

### **3.2.2 Подготовка к проведению экспериментальных исследований**

Проведение экспериментальных исследований требует тщательной подготовки. Подготовка [36] к проведению экспериментальных исследований включает в себя:

- выбор высокоточного оборудования и приборов для измерения;
- организацию работ, согласованных с техническим руководством горнодобывающего предприятия;
- проведение предварительных экспериментальных исследований;
- определение требуемого количества измерений для измеряемых параметров.

#### ***Используемое оборудование***

Для проведения экспериментальных исследований необходимо применить следующие приборы и оборудование:

- цифровой барометр DPI-740 производства фирмы «Druck GF» (абсолютная паспортная погрешность  $\pm 15$  Па);
- крыльчатый анемометр АПР-2 производства фирмы «Экотехинвест» (абсолютная погрешность измерения  $\pm(0,1+0,05 \cdot v)$  м/с);
- лазерный дальномер DISTO<sup>TM</sup> D2 производства фирмы «Leica» (абсолютная паспортная погрешность  $\pm 0,0015$  м);
- психрометр аспирационный MB-4-2M производства ОАО «Сафоновский завод «Гидрометприбор» (абсолютная погрешность измерения температуры  $\pm 0,1$  °С);
- термовлагомер Fluke-971 производства фирмы «Fluke» (абсолютная паспортная погрешность измерения температуры  $\pm 0,5$  °С; относительной влажности  $\pm 2,5$  %).

### ***Организация работ***

На стадии организации работ необходимо предоставить техническому руководителю предприятия план требуемых мероприятий для проведения экспериментальных исследований. Далее план работы согласуется с участками подъема, вентиляции и техники безопасности, а также с горным диспетчером.

Для успешного проведения эксперимента требуется до окончания работ обеспечить постоянный режим проветривания рудника.

Бригада состоит из двух исследователей (один из которых руководитель), обученных приемам работы с измерительными приборами, и одного сопровождающего. Сопровождающим при передвижении по околоствольному двору рудника является мастер участка вентиляции, а при движении на клетки или скипе по стволу — мастер участка подъема.

При нахождении на смотровой площадке подъемного сосуда необходимо использовать страховочное оборудование.

### Определение количества измерений

Для наиболее корректного и точного проведения эксперимента выполняются расчеты по определению требуемого количества измерений аэротермодинамических параметров воздуха (давление, температура, влажность, скорость) с достаточной степенью точности [14,21,44].

Были проведены предварительные экспериментальные исследования по измерению давления, температуры и влажности воздуха в стволе, а также расхода воздуха в выработках, соединяющихся со стволом. По результатам проведенных исследований установлено, что измеряемые величины имеют разброс, подчиняющийся нормальному закону распределения.

Для определения требуемого количества измерений  $N$ , исходя из заданного доверительного интервала и приборной погрешности, используется решение обратной задачи математической статистики [93]:

$$\frac{\sqrt{N_k - 1}}{t_p(N_k, p)} = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_{k \text{ приб}}}, \quad (3.25)$$

где  $t_p(N_k, p)$  – коэффициент Стьюдента, определяемый по данным [93];  $p$  – требуемая надежность измерений, принимается равной 0.95;  $\varepsilon_k$  – погрешность измерений  $k$ -ой физической величины;  $\varepsilon_{k \text{ приб}}$  – приборная погрешность измерения  $k$ -ой физической величины.

Расход воздуха  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) определяется косвенно, через произведение результатов прямых измерений скорости движения воздуха  $v$  (м/с), ширины  $a$  (м) и высоты  $b$  (м) поперечного сечения выработки. Поэтому суммарная относительная погрешность измерения расхода определяется суммой относительных погрешностей прямых измерений:

$$\varepsilon_Q = \varepsilon_v + \varepsilon_a + \varepsilon_b, \quad (3.26)$$

где  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$  – относительные погрешности измерений соответственно скорости, длины и ширины горной выработки.

По результатам проведенного расчета требуемые количества измерений давления ( $N_p$ ), температуры ( $N_t$ ) и относительной влажности ( $N_\varphi$ ) воздуха, а также

высоты ( $N_b$ ) и ширины ( $N_a$ ) горных выработок, соединяющихся со стволом, и скорости воздуха ( $N_v$ ) в этих выработках равны:  $N_p=7$ ,  $N_t=7$ ,  $N_\varphi=7$ ,  $N_b= N_a=3$ ,  $N_v=7$ , соответственно.

### **3.2.3 Методика выполнения замеров и обработки требуемых параметров воздуха**

Выполнение замеров требуемых параметров воздуха для определения аэродинамического сопротивления стволов делится на:

- определение термодинамических параметров воздуха ( $P, T, \zeta$ ) на исследуемом участке ствола;
- определение скорости воздуха и площади поперечного сечения в горных выработках, прилегающих к стволу.

#### *Измерение давления ( $P$ ) воздуха*

Измерение давления воздуха в стволе производится с помощью микробарометра DPI-740 фирмы «Druck». На исследуемом участке ствола замеры производятся в двух точках — начальной и конечной, по 7 измерений в каждой. При проведении замеров давления бригада исследователей располагается на смотровой площадке подъемного сосуда. Каждый замер фиксируется в дневнике исследователя и в дальнейшем вычисляется среднее значение давления в каждой точке.

На поверхности установлена стационарная «метеостанция», которая фиксирует изменение атмосферного давления в течение всего времени исследования. В состав «метеостанции» входит компьютер и соединенный с ним микробарометр DPI-740.

Выполнение измерения давления воздуха в требуемых точках ствола можно начинать сразу после остановки подъемных сосудов.

### ***Измерение температуры (Т) и влажности воздуха (ξ)***

Температура и влажность воздуха в стволе измеряются с помощью термовлагомера Fluke-971 фирмы «Fluke» и психрометра аспирационного МВ-4-2М. Проведение замеров температуры и влажности воздуха производится в двух точках — начальной и конечной — по 7 измерений в каждой. Точки замера температуры и влажности воздуха совпадают с точками замера давления.

Выполнение измерений в требуемых точках ствола следует начинать через 5-10 минут после остановки движения подъемного сосуда. Такой промежуток времени необходим для выравнивания воздушных потоков.

### ***Измерение скорости воздуха***

Измерение скорости воздуха в горных выработках, прилегающих к стволу, осуществляется с помощью крыльчатого анемометра АПР-2 фирмы «Экотехинвест». Выполнение измерений скорости воздуха осуществляется путем равномерного обвода всего сечения выработки в горизонтальном (рис. 3.18) и вертикальном (рис. 3.15) направлениях.

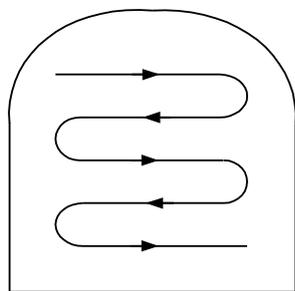


Рисунок 3.18

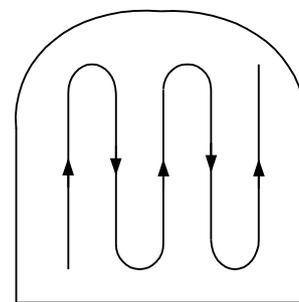


Рисунок 3.19

Время выполнения замера в выработках сечением до 15 м<sup>2</sup> должно быть не менее 100 секунд, в выработках сечением 15-25 м<sup>2</sup> – 200 секунд.

В каждой исследуемой выработке необходимо провести по 7 измерений скорости воздуха.

### ***Измерение площади поперечного сечения горных выработок***

Площадь поперечного сечения горных выработок измеряется лазерным дальномером DISTO™ D2 фирмы «Leica». Для точного определения площади

поперечного сечения необходимо провести по 3 измерения высоты и ширины горной выработки, а затем по этим размерам построить ее сечение в одном из графических редакторов («AutoCAD», «Компас» и др.). Замерять площадь поперечного сечения выработки нужно в том месте, где производился замер скорости воздуха.

Полученные результаты экспериментальных исследований обрабатываются в соответствии с теорией статистической обработки данных [21,93].

Среднее значение измеряемой величины определяется по формуле:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, \quad (3.27)$$

где  $n$  – количество проведенных замеров параметра в стволе;  $k$  – порядковый номер измерения.

Среднее квадратичное отклонение определяется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (3.28)$$

Полуширина доверительного интервала определяется по формуле:

$$\Delta x_{случ} = t_p(n, p) \cdot \sigma. \quad (3.29)$$

Результат измерений величины  $x$  записывается в виде:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x_{случ} \pm \Delta x_{приб}. \quad (3.30)$$

Экспериментальные исследования аэротермодинамических параметров воздуха в стволах и прилегающих к ним выработках проводились в условиях рудников «Октябрьский» и «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель» в ходе проведения воздушно-депресссионных и термо-влажностных съемок.

### **3.2.4 Верификация методики экспериментального определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов**

В ходе проведения экспериментальных исследований определены температуры и давления на границах исследуемых участков воздухоподающих и вентиляционных стволов рудников «Октябрьский» и «Таймырский». Количество

замеров соответствует расчетному значению (раздел 3.2.2). Результаты проведенных замеров и их обработки приведены в таблицах 3.12, 3.13.

Таблица 3.12 — Данные измерений температуры (°С) и давления (Па) воздуха в верхней и нижней точках исследуемого участка стволов рудника «Октябрьский» и результаты их статистической обработки

№ замера	Температура воздуха в верхней точке, °С	Температура воздуха в нижней точке, °С	Абсолютное давление воздуха в верхней точке, Па	Абсолютное давление воздуха в нижней точке, Па	Депрессия на участке ствола, Па
<b>Ствол КС-2 (протяженность участка — 710 м)</b>					
1	13,9	18,1	103948	112687	306
2	14,1	18	103940	112690	295
3	14,3	18,9	103927	112663	309
4	14	17,9	103890	112631	304
5	14,5	18,1	103948	112696	297
6	14,1	18	103960	112719	286
7	14,3	18,1	103949	112697	297
$x_{cp}$	14,2	18,2	103938	112683	300
$\sigma$	0,08	0,13	9	11	3
$\Delta x_{случ}$	0,2	0,3	22	26	7
$x$	14,2±0,3	18,2±0,4	103938±37	112683±41	300±37
<b>Ствол ВС-4 (протяженность участка — 504 м)</b>					
1	15,5	18,9	98252	104473	245
2	15,8	19	98267	104500	257
3	15,7	19,8	98261	104495	258
4	15,1	18,9	98254	104529	299
5	15,6	19,1	98216	104443	251
6	15,4	18,7	98275	104511	260
7	15,5	18,9	98272	104505	257
$x_{cp}$	15,5	19	98257	104494	261

$\sigma$	0,08	0,13	8	11	6
$\Delta x_{случ}$	0,2	0,3	19	26	14
$x$	15,5±0,3	19±0,4	98257±34	104494±41	261±44
<b>Ствол КС-1 (протяженность участка — 710 м)</b>					
<b>1</b>	17,2	21	100691	109011	378
<b>2</b>	16,9	20,8	100684	109015	367
<b>3</b>	17,3	20,9	100667	108975	390
<b>4</b>	17,1	21,7	100630	108954	374
<b>5</b>	16,7	20,9	100694	109022	370
<b>6</b>	16,9	20,8	100707	109048	357
<b>7</b>	17,1	20,9	100693	109025	366
$x_{ср}$	17	21	100681	109007	371
$\sigma$	0,08	0,12	9	12	4
$\Delta x_{случ}$	0,2	0,3	22	29	9
$x$	17±0,3	21±0,4	100681±37	109007±44	371±39

Таблица 3.13 — Данные измерений температуры (°С) и давления (Па) воздуха в верхней и нижней точках исследуемого участка стволов рудника «Таймырский» и результаты их статистической обработки

№ замера	Температура воздуха в верхней точке, °С	Температура воздуха в нижней точке, °С	Абсолютное давление воздуха в верхней точке, Па	Абсолютное давление воздуха в нижней точке, Па	Депрессия на участке ствола, Па
<b>Ствол КС-3 (протяженность участка — 1056 м)</b>					
<b>1</b>	14,6	20,8	104661	117582	739
<b>2</b>	14,7	21,2	104646	117570	736
<b>3</b>	14,8	21,3	104633	117551	742
<b>4</b>	15,1	21,4	104639	117528	771
<b>5</b>	14,5	21,5	104684	117602	742
<b>6</b>	14,8	21,2	104638	117565	733

<b>7</b>	14,6	21,0	104656	117581	735
$x_{ср}$	14,7	21,2	104651	117568	743
$\sigma$	0,08	0,09	7	9	5
$\Delta x_{случ}$	0,2	0,2	17	22	12
$x$	14,7±0,3	21,2±0,3	104651±32	117568±37	743±42
<b>Ствол ВС-5 (протяженность участка — 1243 м)</b>					
<b>1</b>	12,4	20,3	100811	117733	1330
<b>2</b>	12,5	21	100894	117784	1298
<b>3</b>	12,8	20,4	100837	117764	1335
<b>4</b>	12	19,8	100838	117763	1333
<b>5</b>	13	20,7	100827	117752	1333
<b>6</b>	12,5	20,4	100791	117710	1327
<b>7</b>	12,4	20,2	100828	117747	1327
$x_{ср}$	12,5	20,4	100832	117750	1326
$\sigma$	0,12	0,14	12	9	5
$\Delta x_{случ}$	0,3	0,3	29	22	12
$x$	12,5±0,4	20,4±0,4	100832±44	117750±37	1326±42

### 3.3 Расчет аэродинамического сопротивления шахтных стволов по данным экспериментальных исследований

По данным результатов экспериментальных исследований производился расчет аэродинамических сопротивлений участков шахтных стволов.

$$\Delta R = \frac{\Delta P}{Q^2}, \quad (3.31)$$

где  $\Delta P$  – депрессия исследуемого участка ствола, мм.вод.ст.;  $Q$  – количество воздуха, поступающее по стволу в рудник, м<sup>3</sup>/с.

При расчете депрессии исследуемого участка ствола необходимо учитывать поправки:

- изменение атмосферного давления ( $\Delta P_{Атм}$ );

- гидростатическое сжатие воздуха при опускании на глубину ( $\rho_{cp} \cdot g \cdot L$ ).

$$\Delta P = P_1 - (P_2 \pm \Delta P_{Атм} - \rho_{cp} \cdot g \cdot L), \quad (3.32)$$

где  $P_1$  – абсолютное давление в начальной точке измеряемого участка ствола, Па;  $P_2$  – абсолютное давление в конечной точке измеряемого участка ствола, Па;  $\pm \Delta P_{Атм}$  – изменение атмосферного давления, Па (знак «+» - атмосферное давление возросло, знак «-» - атмосферное давление снизилось);  $\rho_{cp}$  – средняя плотность воздуха на участке ствола «1-2», кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – протяженность исследуемого участка ствола, м.

$$Q_{ств} = \sum_{j=1}^n v_j \cdot S_j, \quad (3.33)$$

где  $v_j$  – скорость движения воздуха в  $j$ -ой выработке, имеющей выход к стволу, м/с;  $S_j$  – площадь поперечного сечения  $j$ -ой выработки, имеющей выход к стволу.

Подставим уравнения (3.32) и (3.33) в (3.31):

$$\Delta R = \frac{P_1 - (P_2 \pm \Delta P_{Атм} - \rho_{cp} \cdot g \cdot L_{1-2})}{\left( \sum_{j=1}^n v_j \cdot S_j \right)^2}. \quad (3.34)$$

Полученная формула позволяет определять аэродинамическое сопротивление исследуемого участка шахтного ствола.

Аэродинамическое сопротивление исследуемого участка ствола зависит от геометрических параметров ствола ( $L_{1-2}$ ) и ( $S$ ), а также от коэффициента аэродинамического сопротивления ( $\alpha_{1-2}$ ).

$$\Delta R = \frac{\alpha_{1-2} \cdot p \cdot L_{1-2}}{S^3}, \quad (3.35)$$

где  $p$  – периметр ствола, м;  $S$  – площадь поперечного сечения ствола, м<sup>2</sup>.

Имеющиеся немногочисленные справочные данные не дают однозначного ответа по выбору коэффициента аэродинамического сопротивления шахтных стволов в зависимости от типа армировки и крепления. Следовательно, единственным корректным и точным способом определения коэффициента  $\alpha$  является проведение экспериментальных исследований существующих стволов.

Приравняв уравнения (3.33) и (3.34), выразим ( $\alpha_{1-2}$ ):

$$\alpha_{1-2} = \frac{(P_1 - (P_2 \pm \Delta P_{Амм} - \rho_{cp} \cdot g \cdot L_{1-2})) \cdot S^3}{p \cdot L_{1-2} \cdot \left( \sum_{j=1}^n v_j \cdot S_j \right)}. \quad (3.36)$$

Далее приведем полученный экспериментально коэффициент аэродинамического сопротивления шахтного ствола к стандартному значению ( $\alpha$  для участка ствола 100 метров).

$$\alpha_{100} = \alpha_{1-2} \cdot \frac{L_{100}}{L_{1-2}} \cdot \frac{\gamma_0}{\gamma_{cp}}, \quad (3.37)$$

где  $L_{100}$  – участок ствола длиной 100 метров;  $\gamma_0$  – удельный вес воздуха при стандартных условиях, 1,225 кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{cp}$  – удельный вес воздуха на участке ствола 1-2, кг/м<sup>3</sup>.

Для вновь проектируемых стволов необходимо проводить сопоставление со справочными данными подобных по геометрическим параметрам, креплению и армировке стволов.

### 3.4 Выводы по главе

В главе описана разработанная методика определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов. На основании проведенных исследований по определению аэродинамических сопротивлений шахтных стволов сделаны следующие выводы:

1. Вычисленные границы замерных участков на воздухоподающих и вентиляционных стволах отличаются от справочных. Установлено, что измерение термодинамических параметров воздуха в воздухоподающем стволе необходимо начинать через 100 метров после сопряжения ствола с калориферным каналом, конечная точка проведения замеров расположена непосредственно перед сопряжением ствола с горизонтом. В вентиляционном стволе замеры давления, температуры и влажности следует начинать через 75 метров после сопряжения с верхним горизонтом,

конечные замеры можно производить в сечении ствола перед сопряжением с вентиляционным каналом.

2. Выявленные факторы — изменение атмосферного давления и гидростатическое сжатие воздуха (при увеличении глубины ствола), влияют на определение аэродинамического сопротивления шахтных стволов. Изменение атмосферного давления необходимо учитывать при проведении экспериментальных исследований, гидростатическое сжатие воздуха учитывается при обработке замеренных данных.

3. Установлена линейная зависимость распределения температуры и давления воздуха вдоль ствола по глубине. Таким образом, для расчета средней плотности воздуха (учитывается при поправке на гидростатическое сжатие воздуха) по исследуемому участку ствола необходимо и достаточно выполнения замеров термодинамических параметров на границах исследуемых участков.

4. Усовершенствованный способ определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» проверен многочисленными экспериментальными исследованиями.

5. Вычисленные на основании экспериментальных исследований аэродинамические сопротивления шахтных стволов рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» для разработки математической модели вентиляционной сети отличаются от проектных.

#### **4. Разработка способов оптимизации энергопотребления при проветривании вентиляционных сетей рудников со сложными системами вентиляции**

Для разработки способов оптимизации энергопотребления при проветривании вентиляционных сетей рудников со сложными системами вентиляции необходимо решить следующие задачи:

- рационально распределить воздух между рабочими зонами (участками) вентиляционной сети рудников;
- определить минимальное количество средств регулирования воздухораспределения;
- минимизировать суммарную потребляемую мощность ГВУ.

Анализ существующих систем регулирования воздухораспределения в вентиляционных сетях [7,17,38,64] позволяет сделать вывод, что в современных условиях нет инструментов, позволяющих минимизировать потребляемую мощность одновременно работающих двух и более ГВУ.

В условиях разветвленных и протяженных рудников данная задача особенно актуальна в связи с тем, что на каждом из рудников установлено от двух до четырех главных вентиляторных установок, которые проветривают разные участки вентиляционной сети. Чтобы подобрать оптимальные параметры всех ГВУ, необходимо знать, на какой участок вентиляционной сети влияет каждая из них.

##### **4.1 Постановка задачи оптимизации параметров вентиляционных сооружений и режимов работы двух и более ГВУ по критерию минимизации потребляемой мощности**

Решение задачи оптимизации параметров вентиляционных сооружений и режимов работы двух и более ГВУ по критерию минимизации потребляемой мощности требуется начинать с разработки математической модели рудничной вентиляционной сети.

Любую рудничную вентиляционную сеть можно представить в виде ориентированного графа:

$$G = \{E, V\}, \quad (4.1)$$

где  $E$  — множество ветвей графа  $e_j \in E$ ;  $V$  — множество узлов графа  $v_i \in V$ .

Введенные объекты «ветвь» и «узел» являются геометрическими и не содержат информации о физических свойствах протекающего по выработкам воздуха. Поэтому расширим данные понятия, добавив к ним ряд значимых для рассматриваемой задачи свойств. Введем понятие физической ветви как расширения обычного графового понятия ветви. Будем понимать под физической ветвью объект со следующими свойствами

$$\hat{e}_j = e_j \cup \{Q_j, H_j^{HT}, R_j^{BC}, \Delta p_j, L_j, S_j, \alpha_j, R_j\}, \quad (4.2)$$

где  $Q_j$  — расход воздуха в  $j$ -той ветви графа, м<sup>3</sup>/с;  $H_j^{HT}$  — напор источника тяги в  $j$ -ой ветви, Па;  $R_j^{BC}$  — аэродинамическое сопротивление вентиляционного сооружения в  $j$ -ой ветви, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>;  $\Delta p_j$  — перепад давления на  $j$ -той ветви, Па;  $L_j$  — длина  $j$ -той ветви, м;  $S_j$  — площадь поперечного сечения  $j$ -той ветви, м<sup>2</sup>;  $\alpha_j$  — коэффициент аэродинамического сопротивления  $j$ -той ветви, кг/м<sup>3</sup>;  $R_j$  — аэродинамическое сопротивление  $j$ -той ветви, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>.

Если в ветви установлен источник тяги или вентиляционное сооружение, то их свойства задаются следующими функциями:

$$H_j^{HT} = H_j(Q_j, n, \beta), \quad (4.3)$$

$$R_j^{BC} = R_j(Q_j, \Delta S), \quad (4.4)$$

где  $n$  — частота вращения рабочего колеса вентилятора, об/мин;  $\beta$  — угол установки лопаток рабочего колеса (направляющего аппарата), °;  $\Delta S$  — площадь поперечного сечения вентиляционного окна в вентиляционном сооружении.

Если в ветви отсутствует источник тяги или вентиляционное сооружение, тогда

$$H_j^{HT} = 0, \quad (4.5)$$

$$R_j^{BC} = 0. \quad (4.6)$$

Каждый из узлов  $v_i$  графа рудничной вентиляционной сети  $G$  обладает следующими свойствами:

$$\hat{v}_i = v_i \cup \{h_i, t_i, \varphi_i, P_i\}, \quad (4.7)$$

где  $h_i$  — значение высотной отметки в  $i$ -том узле, м;  $t_i$  — температура воздуха в  $i$ -том узле, °С;  $\varphi_i$  — относительная влажность воздуха в  $i$ -том узле, %;  $P_i$  — давление воздуха в  $i$ -том узле, Па.

Также  $\forall v_i$  обладает свойством связи с атмосферой:

$$v_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \quad (4.8)$$

где  $v_i = 1$  — узел имеет аэродинамическую связь с атмосферой;  $v_i = 0$  — узел не имеет аэродинамической связи с атмосферой.

Каждый из источников тяги ( $F$ ) характеризуется напорной и мощностной характеристиками, а также характеристикой КПД.

Режим проветривания рудника считается энергоэффективным, если при условии обеспеченности всех потребителей требуемым количеством воздуха суммарная мощность всех источников тяги минимальна.

Математически это означает минимизацию следующего функционала:

$$N_{\Sigma} = \sum_{m=1}^{N_F} N_m \rightarrow \min, \quad (4.9)$$

при условии выполнения следующих неравенств:

$$\forall j \in D_Q : Q_j \geq Q_j^*. \quad (4.10)$$

Здесь  $\sum_{m=1}^{N_F} N_m$  — суммарная потребляемая мощность всех источников тяги (главных вентиляторных установок);  $Q_j^*$  — расчетное значение расхода воздуха в  $j$ -той ветви.

Мощность каждого источника тяги определяется в зависимости от следующих параметров:

$$N_j = N_j(n_j, \beta_j, Q_j, H_j, \eta_j). \quad (4.11)$$

Для решения задачи определения оптимальных параметров ГВУ и вентиляционных сооружений в вентиляционных сетях рудников со сложными системами вентиляции необходимо:

- обеспечить рабочие зоны (участки) вентиляционной сети таким объемом свежего воздуха, величина которого не меньше расчетного значения;
- оптимизировать параметры работы каждой из главной вентиляторных установок, чтобы каждая из них работала максимально эффективно на свой участок вентиляционной сети.

#### **4.1.1 Анализ зон влияния ГВУ и вентиляционных сооружений на проветривание участков рудничной вентиляционной сети**

Для определения степени влияния каждой главной вентиляторной установки и каждого вентиляционного сооружения на проветривание участков вентиляционной сети рудников введем понятие матрицы влияния  $I$ , элемент  $I_{jm}$  которой определяется по формуле:

$$I_{jm(n)} = \frac{\Delta Q_{jm(n)}}{\Delta Q_{m(n)}}, \quad (4.12)$$

где  $\Delta Q_{jm(n)}$  — изменение (отклик) количества воздуха в  $j$ -той выработке при малой вариации производительности  $m$ -ой ГВУ (расхода  $n$ -ого вентиляционного сооружения);  $\Delta Q_{m(n)}$  — вариация производительности  $m$ -ой ГВУ (расхода  $n$ -ым вентиляционным сооружением).

Другими словами, матрица влияния характеризует, как производительность  $m$ -ой ГВУ ( $n$ -ого вентиляционного сооружения) влияет на величину расхода воздуха в каждой  $j$ -той выработке.

$$\Delta Q_{jm(n)} = Q_{j0} - Q_{jm(n)}^*, \quad (4.13)$$

где  $Q_{j0}$  — расход воздуха в  $j$ -той выработке до изменения производительности  $m$ -ого ГВУ (площади поперечного сечения вентиляционного окна  $n$ -ого

вентиляционного сооружения);  $Q_{jm(n)}^*$  — расход воздуха в  $j$ -той выработке после изменения производительности  $m$ -ого ГВУ (площади поперечного сечения вентиляционного окна  $n$ -ого вентиляционного сооружения).

Расход воздуха в  $j$ -ой выработке является функцией производительностей всех источников тяги и пропускной способности всех вентиляционных сооружений

$$Q_j = Q_j(Q_1^{ГВУ(BC)}, \dots, Q_{M(N)}^{ГВУ(BC)}), \quad (4.14)$$

где  $M$  — число всех ГВУ, а  $N$  — количество вентиляционных сооружений. Исходя из этого, формулу (4.12) можно интерпретировать как частную производную этой функции по одному из расходов воздуха через ГВУ или ВС:

$$\frac{\partial Q_j}{\partial Q_{m(n)}} \sim \frac{Q_j(Q_{m(n)}^{ГВУ(BC)}) - Q_j(Q_{m(n)}^{ГВУ(BC)} + \Delta Q_{m(n)})}{\Delta Q_{m(n)}}. \quad (4.15)$$

Проанализируем физический смысл матрицы влияния на примере простейшей модели вентиляционной сети (Рис. 4.1).

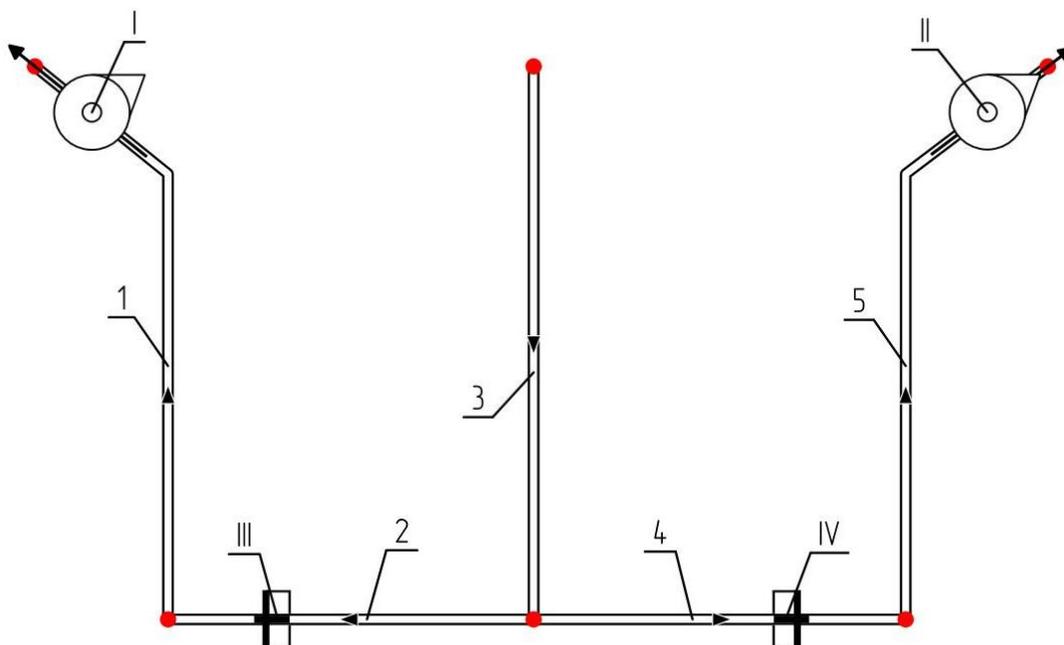


Рисунок 4.1 — Графическое представление простейшей вентиляционной сети рудника, в проветривании которого участвуют две главные вентиляторные установки и два вентиляционных сооружения

На рисунке 4.1 и в формуле (4.16) римскими цифровыми значениями обозначены источники регулирования воздухораспределения, арабскими — номера ветвей вентиляционной сети.

Представим матрицу влияния  $I$  простейшей вентиляционной сети рудника, в проветривании которого участвуют две главные вентиляторные установки и два вентиляционных сооружения, в виде

$$I = \begin{pmatrix} \frac{\Delta Q_{1I}}{\Delta Q_I} & \dots & \frac{\Delta Q_{5I}}{\Delta Q_I} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\Delta Q_{1IV}}{\Delta Q_{IV}} & \dots & \frac{\Delta Q_{5IV}}{\Delta Q_{IV}} \end{pmatrix}, \quad (4.16)$$

где  $m$ -ая строка матрицы содержит информацию о том, как  $m$ -ый регулятор (источник тяги или вентиляционное сооружение от I до IV) влияет на каждую из выработок (от 1 до 5);  $j$ -ый столбец матрицы характеризует, как на  $j$ -тую выработку (от 1 до 5) влияет каждый из регуляторов (источник тяги или вентиляционное сооружение от I до IV).

Далее матрица влияния  $I$  будет использована для разработки алгоритма оптимизации параметров вентиляционных сооружений и режимов работы нескольких ГВУ в вентиляционных сетях рудников по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности, а также для определения степени влияния каждого вентиляционного сооружения и каждой главной вентиляторной установки на сеть горных выработок.

#### **4.1.2 Определение оптимальных режимов работы ГВУ, обеспечивающих нормативные расходы воздуха при минимальных затратах энергии**

Для разработки алгоритма регулирования совместных режимов работы нескольких ГВУ в вентиляционных сетях рудников по критерию минимальной потребляемой мощности примем следующие правила:

1. Если есть рабочая зона (участок) вентиляционной сети, в которой расход меньше требуемого, то хотя бы одна ГВУ увеличивает частоту вращения.
2. Если в рабочей зоне (участке) вентиляционной сети выявлен перерасход воздуха, то хотя бы одна из ГВУ снижает частоту вращения.
3. Увеличивать подачу воздуха следует за счет повышения частоты вращения рабочего колеса ГВУ с наименьшей потребляемой мощностью, при условии равнозначного влияния нескольких ГВУ на рабочую зону.
4. Уменьшать подачу воздуха следует за счет понижения частоты вращения рабочего колеса главной вентиляторной установки с наибольшей потребляемой мощностью, при условии равнозначного влияния нескольких ГВУ на рабочую зону.
5. Корректировать расход воздуха в рабочей зоне (участке) вентиляционной сети следует за счет ГВУ, в наибольшей степени влияющей на расход в этой рабочей зоне (участке).

При разработке способа регулирования совместной работы нескольких ГВУ требуется соблюдать правила (1-5), установленные для регулирования частоты вращения рабочего колеса, которые учитываются в следующей математической зависимости:

$$\Delta n_{jm} \sim k_{эфф.m} \cdot I_{jm} \cdot \Delta Q_j, \quad (4.17)$$

где

$k_{эфф.m}$  — коэффициент, характеризующий эффективность регулирования частотой вращения рабочего колеса одной из  $m$ -ой ГВУ с наименьшей потребляемой мощностью;

$I_{jm}$  — матрица влияния, характеризующая влияние производительности  $m$ -ой ГВУ на величину расхода воздуха в каждой  $j$ -той выработке;

$\Delta Q_j$  — ошибка управления расходами (отклонение фактических расходов от требуемых).

Для пересчета аэродинамических и энергетических характеристик воспользуемся законами подобия [23]:

$$\begin{cases} \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \\ \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \\ \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \end{cases} \quad (4.18)$$

Из выражения (4.18) видно, что  $Q \sim n$ ,  $H \sim n^2$ ,  $N \sim n^3$ .

Поскольку одним из основных условий регулирования частоты вращения рабочего колеса является минимизация суммарной потребляемой мощности, воспользуемся условием  $N \sim n^3$ .

Продифференцируем обе части выражения по частоте вращения рабочего колеса главной вентиляторной установки:

$$\frac{\partial N}{\partial n} \sim 3n^2. \quad (4.19)$$

Согласно вышеперечисленным правилам, требуется регулировать распределение расходов воздуха главными вентиляторными установками в двух случаях:

– если рабочие зоны (участки) вентиляционной сети испытывают существенный дефицит воздуха, тогда регулирование частоты вращения рабочего колеса будет осуществляться в первую очередь для тех ГВУ, для которых приращение частоты приводит к наименьшему приращению мощности:

$$\Delta n_m \sim \frac{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2}{N_{ГВУ}} \cdot \frac{1}{n_m^2}, \quad (4.20)$$

где  $n_k$  — частота вращения рабочего колеса  $k$ -ой главной вентиляторной установки;  $N_{ГВУ}$  — количество главных вентиляторных установок.

– если рабочие зоны (участки) вентиляционной сети проветриваются с существенным запасом, тогда регулирование частоты вращения рабочего

колеса будет осуществляться в первую очередь для тех ГВУ, для которых уменьшение частоты приводит к наибольшему уменьшению мощности:

$$\Delta n_m \sim \frac{N_{ГВУ}}{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2} \cdot n_m^2. \quad (4.21)$$

Таким образом, коэффициент, характеризующий эффективность регулирования частоты вращения рабочего колеса каждой ГВУ определяется отдельно:

- для рабочих зон, испытывающих дефицит воздуха,

$$k_{эфф.m(деф.)} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2}{N_{ГВУ}} \cdot \frac{1}{n_m^2}; \quad (4.22)$$

- для рабочих зон, которые проветриваются с существенным запасом,

$$k_{эфф.m(зан.)} = \frac{N_{ГВУ}}{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2} \cdot n_m^2. \quad (4.23)$$

Матрица влияния  $I_{jm}$  определена в разделе (4.1.1) и выглядит следующим образом:

$$I_{jm} = \frac{\Delta Q_{jm}}{\Delta Q_m}. \quad (4.24)$$

В выражении (4.24) матрица влияния  $I_{jm}$ , характеризует, как производительность  $m$ -ой ГВУ влияет на величину расхода воздуха в каждой  $j$ -той выработке.

Для определения ошибки отклонения расходов воспользуемся значениями фактических расходов воздуха и требуемых:

$$\Delta Q_j = Q_{зам.j} - Q_j^*, \quad (4.25)$$

где  $Q_{зам.j}$  — расход воздуха, замеренный в  $j$ -той выработке;  $Q_j^*$  — требуемый расход воздуха в  $j$ -той выработке.

Регулирование воздуха главными вентиляторными установками производится, когда рабочие зоны испытывают дефицит воздуха или в них наблюдается перерасход.

Для того чтобы учесть дефицит воздуха в рабочих зонах и перерасход его в уравнении (4.17), воспользуемся следующими условиями:

- выберем выработку вентиляционной сети с максимальным дефицитом воздуха ( $\max_j \Delta Q_j^+$ ) и будем увеличивать частоту вращения рабочего колеса до тех пор, пока не исчезнет дефицит воздуха во всех выработках сети ( $\max_j \Delta Q_j \geq 0$ );
- если во всех выработках вентиляционной сети наблюдается избыточное количество воздуха ( $\min_j \Delta Q_j^-$ ), тогда необходимо уменьшать частоту вращения рабочих колес главных вентиляторных установок до тех пор, пока перерасход воздуха хотя бы в одной выработке сети не уменьшится до нуля ( $\min_j \Delta Q_j^- \approx 0$ ).

Уравнение (4.17) примет следующий вид, в котором корректировочная величина изменения частоты вращения рабочих колёс ГВУ не привязана к конкретной выработке  $j$ , а определяется по экстремальным значениям дефицита и избытка воздуха во всех выработках:

$$\frac{\Delta n_m}{\Delta t} = A \cdot \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2}{N_{ГВУ} \cdot n_m^2} \cdot I_{jm(деф.)} \cdot \max_j \Delta Q_j^+ - \frac{N_{ГВУ} \cdot n_m^2}{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2} \cdot I_{jm(пер.)} \cdot \min_j \Delta Q_j^- \right), \quad (4.26)$$

где  $A$  — интенсивность регулирования;  $\Delta t$  — шаг по времени.

Полученная зависимость характеризует регулирование частоты вращения  $m$ -ой главной вентиляторной установки с учетом дефицита и перерасхода воздуха в рабочих зонах рудника.

Для повышения эффективности перераспределения воздуха между рабочими зонами рудников по критерию минимизации суммарной потребляемой

мощности главных вентиляторных установок необходимо помимо регулирования частоты вращения рабочего колеса использовать средства отрицательного регулирования (вентиляционные переключки, автоматические вентиляционные двери).

#### **4.1.3 Оптимизация воздухораспределения в рудничной сети на основе регулирования воздушных потоков вентиляционными сооружениями**

Для разработки алгоритма регулирования параметров вентиляционных сооружений в вентиляционных сетях рудников по критерию минимальной потребляемой мощности примем следующие дополнительные правила:

6. Если есть рабочая зона (участок) вентиляционной сети, в которой расход воздуха меньше требуемого, а все вентиляционные сооружения закрыты, то необходимо начинать открывание вентиляционных сооружений, влияющих на данную рабочую зону.
7. Если в рабочей зоне (участке) вентиляционной сети выявлен перерасход воздуха, то для ограничения подачи воздуха необходимо устанавливать вентиляционные сооружения, влияющие на данную рабочую зону.
8. Корректировать расход воздуха в рабочей зоне (участке) вентиляционной сети следует за счет вентиляционных сооружений, в наибольшей степени влияющих на расход в этой рабочей зоне (участке).

Вышеперечисленные правила (6-8), установленные для регулирования воздухораспределения с помощью вентиляционных сооружений, учитываются в следующем выражении:

$$\Delta S_{jn} \sim k_{эфф.n} \cdot I_{jn} \cdot \Delta Q_j, \quad (4.27)$$

где

$k_{эфф.n}$  — коэффициент, характеризующий эффективность регулирования воздухораспределения с помощью вентиляционных сооружений;

$I_{jn}$  — матрица влияния, характеризующая влияние установки  $n$ -ого вентиляционного сооружения на величину расхода в каждой  $j$ -той выработке;

$\Delta Q_j$  — ошибка управления расходами (отклонение фактических расходов от требуемых).

Поскольку одним из основных условий регулирования распределения расходов воздуха с помощью вентиляционных сооружений является минимизация суммарной потребляемой мощности, воспользуемся следующей зависимостью:

$$N \sim R \cdot Q^3, \quad (4.28)$$

где

$R$  — аэродинамическое сопротивление вентиляционного сооружения;

$Q$  — расход воздуха, проходящего через вентиляционное сооружение.

Продифференцируем обе части выражения по расходу воздуха, проходящему через вентиляционное сооружение:

$$\frac{\partial N}{\partial Q} \sim 3 \cdot R \cdot Q^2. \quad (4.29)$$

Регулирование с помощью вентиляционных сооружений производится в случаях, когда рабочие зоны (участки) вентиляционной сети испытывают дефицит свежего воздуха (4.30) или на проветривание подается избыточное количество воздуха (4.31):

$$\Delta S_n \sim \frac{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2}{N_{COP}} \cdot \frac{1}{R_n \cdot Q_n^2}, \quad (4.30)$$

где  $R_n$  — аэродинамическое сопротивление  $n$ -ого средства отрицательного регулирования;  $Q_n$  — расход воздуха, проходящий через  $n$ -ое вентиляционное сооружение;  $N_{COP}$  — количество средств отрицательного регулирования.

$$\Delta S_n \sim \frac{N_{COP}}{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2} \cdot R_n \cdot Q_n^2. \quad (4.31)$$

Таким образом, коэффициент, характеризующий эффективность регулирования воздухораспределения с помощью вентиляционных сооружений определяется отдельно:

– для рабочих зон, испытывающих дефицит воздуха:

$$k_{эфф.н(деф.)} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2}{N_{COP}} \cdot \frac{1}{R_n \cdot Q_n^2}; \quad (4.32)$$

– для рабочих зон, которые проветриваются с существенным запасом:

$$k_{эфф.н(зан.)} = \frac{N_{COP}}{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2} \cdot R_n \cdot Q_n^2. \quad (4.33)$$

Матрица влияния  $I_{jn}$  определена в разделе 4.1.1 и выглядит следующим образом:

$$I_{jn} = \frac{\Delta Q_{jn}}{\Delta Q_n}. \quad (4.34)$$

В формуле (4.34) матрица влияния  $I_{jn}$  характеризует влияние установки  $n$ -ого вентиляционного сооружения на величину расхода в каждой  $j$ -той выработке.

Для определения ошибки управления расходами воспользуемся выражением (4.25).

Регулирование расхода воздуха с помощью вентиляционных сооружений необходимо для поддержания нормального воздухораспределения в рабочих зонах рудничной вентиляционной сети.

Для того чтобы учесть дефицит воздуха в рабочих зонах и перерасход его в уравнении (4.27), воспользуемся следующими условиями:

- необходимо выбрать рабочую зону с максимальным дефицитом воздуха ( $\max_j \Delta Q_j^+$ ) и увеличивать сечение вентиляционных окон в средствах отрицательного регулирования до тех пор, пока не исчезнет дефицит воздуха во всех выработках сети ( $\max_j \Delta Q_j \geq 0$ );
- если во всех рабочих зонах вентиляционной сети избыточное количество воздуха ( $\min_j \Delta Q_j^-$ ), тогда необходимо уменьшать сечение вентиляционных окон в средствах отрицательного регулирования до тех пор, пока

перерасход воздуха хотя бы в одной рабочей зоне не уменьшится до нуля ( $\min_j \Delta Q_j^- \approx 0$ ).

По аналогии с (4.26) уравнение (4.27) принимает вид, в котором воздействие  $n$ -го отрицательного регулятора определяется по двум выработкам – с максимальным дефицитом и минимальным избытком расхода воздуха:

$$\frac{\Delta S_n}{\Delta t} = B \cdot \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2}{N_{COP} \cdot R_n \cdot Q_n^2} \cdot I_{jn(деф.)} \cdot \max_j \Delta Q_j^+ - \frac{N_{COP} \cdot R_n \cdot Q_n^2}{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2} \cdot I_{jn(зан.)} \cdot \min_j \Delta Q_j^- \right), \quad (4.35)$$

где  $B$  — интенсивность регулирования;  $\Delta t$  — шаг по времени.

Выражение (4.35) получено для перераспределения расходов воздуха путем изменения площади поперечного сечения  $n$ -ого вентиляционного сооружения с учетом дефицита и перерасхода воздуха в рабочих зонах рудника.

#### 4.1.4 Минимизация потребляемой мощности ГВУ в системе отрицательного регулирования

Совместный способ регулирования воздухораспределения состоит из оптимизации вентиляционных сооружений (4.35) и режимов работы нескольких ГВУ (4.26) в вентиляционных сетях рудников.

Для одновременного оптимального регулирования воздухораспределения главными вентиляторными установками совместно с вентиляционными сооружениями необходимо ввести связующее слагаемое ( $-C \cdot \min_j \Delta S_j$ ), которое следует из правила (6). Данное слагаемое предусмотрено для снижения скорости вращения рабочего колеса вентилятора.

Подбор оптимальных параметров по критерию суммарной минимальной потребляемой мощности производится для ГВУ (путем регулирования частоты вращения рабочего колеса) и вентиляционных сооружений (путем регулирования площади поперечного сечения вентиляционных окон)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta n_m}{\Delta t} = A \cdot \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2}{N_{ГВУ} \cdot n_m^2} \cdot I_{jn(деф.)} \cdot \max_j \Delta Q_j^+ - \frac{N_{ГВУ} \cdot n_m^2}{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2} \cdot I_{jn(зан.)} \cdot \min_j \Delta Q_j^- \right) - C \cdot \min_j \Delta S_j \\ \frac{\Delta S_n}{\Delta t} = B \cdot \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2}{N_{COP} \cdot R_n \cdot Q_n^2} \cdot I_{jn(деф.)} \cdot \max_j \Delta Q_j^+ - \frac{N_{COP} \cdot R_n \cdot Q_n^2}{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2} \cdot I_{jn(зан.)} \cdot \min_j \Delta Q_j^- \right) \end{array} \right. , \quad (4.36)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — параметры регулирования, величина которых выбирается эмпирически. На этапе проектирования они подбираются (уменьшаются или увеличиваются) в зависимости от размера сети и количества регуляторов для улучшения процесса сходимости и ускорения процесса нахождения решения. При введении в эксплуатацию параметры определяются во время пуско-наладочных работ (по результатам проведения замеров).

Выражение (4.36) является конечной зависимостью для оптимизации параметров вентиляционных сооружений и нескольких главных вентиляторных установок по критерию суммарной минимальной потребляемой мощности.

## **4.2 Разработка алгоритма подбора режимов работы каждой ГВУ и параметров вентиляционных сооружений по минимальной потребляемой мощности.**

Разработан алгоритм подбора режимов работы нескольких ГВУ и параметров вентиляционных сооружений для проектирования вентиляции рудников, при условии суммарной минимизации потребляемой мощности всех ГВУ.

Для определения оптимальных режимов работы ГВУ и оптимальных параметров вентиляционных сооружений необходимо проводить расчеты на модели вентиляционной сети. Исходными данными для проведения расчетов являются:

- расчетные значения количества воздуха;
- начальное распределение расходов воздуха в вентиляционной сети;

- места установки ГВУ и вентиляционных сооружений;
- начальные параметры вентиляционных сооружений и ГВУ.

Суть работы алгоритма заключается в том, что на начальном этапе определяется влияние производительности главных вентиляторных установок (расхода воздуха, проходящего через вентиляционные сооружения) на расход воздуха в рабочих зонах рудника. После этого алгоритм одновременно подбирает частоту вращения каждой из ГВУ и сечение вентиляционного окна каждой переключки (вентиляционного сооружения).

В процессе проведения расчета с помощью алгоритма подбирается оптимальное решение по критерию минимизации потребляемой мощности.

Блок-схема алгоритма определения оптимальных параметров главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений представлена на рисунке 4.2:

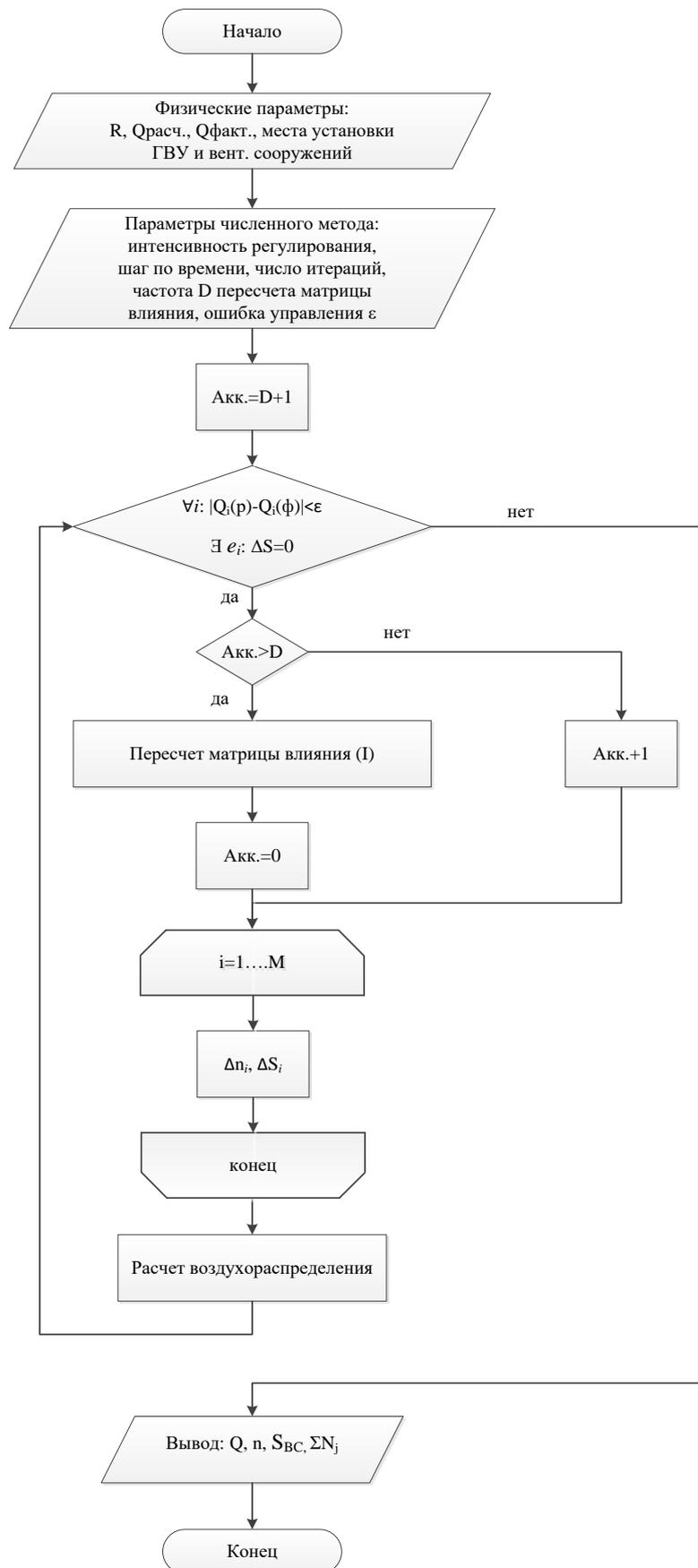


Рисунок 4.2 — Блок-схема алгоритма оптимального регулирования воздухораспределения

Алгоритм подбора режимов работы нескольких ГВУ и параметров вентиляционных сооружений верифицирован на простейших математических моделях вентиляционных сетей в программном комплексе «Wolfram Mathematica».

В программном пакете построена имитационная модель простейшей вентиляционной сети рудника с двумя рабочими зонами, проветриваемого двумя главными вентиляторными установками. Каждая ГВУ в большей степени влияет на свой участок (рабочую зону) сети.

На рисунке 4.3 представлена топология простейшей вентиляционной сети рудника. В модель занесены данные о начальном воздухораспределении, требуемые расходы в рабочей зоне № 1 и № 2, параметры управляемых ГВУ.

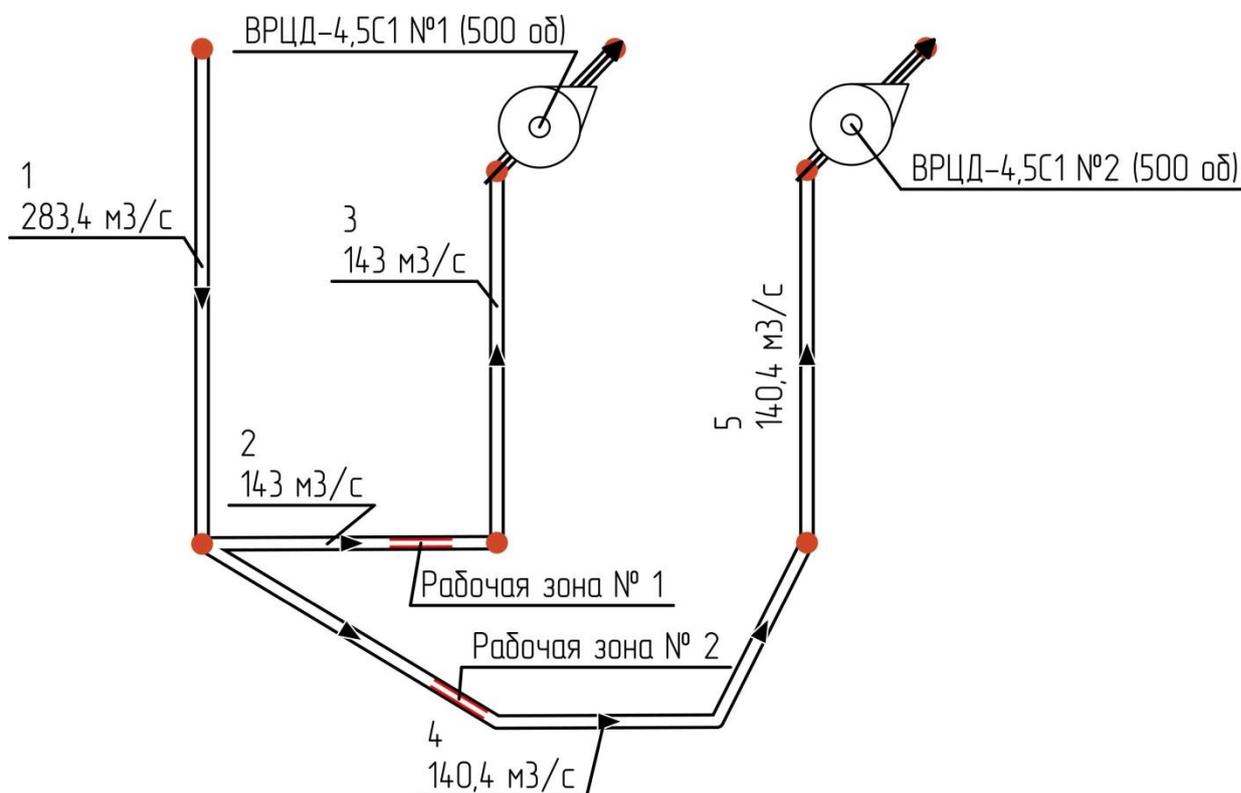


Рисунок 4.3 — Простейшая модель вентиляционной сети рудника, проветривание которого осуществляется двумя ГВУ

В таблице 4.1 приведены основные исходные данные для подбора оптимальных режимов работы ГВУ № 1 и ГВУ № 2, при условии обеспечения требуемыми значениями количества воздуха рабочих зон № 1 и № 2.

Таблица 4.1 — Основные исходные данные для расчета

<b>Параметры</b>	<b>Значения величины показателя</b>
Количество воздуха, поступающего в рудник	283,4 м <sup>3</sup> /с
Фактическое значение количества воздуха, подаваемого на проветривание рабочей зоны № 1	143 м <sup>3</sup> /с
Требуемое значение количества воздуха, подаваемого на проветривание рабочей зоны № 1	110 м <sup>3</sup> /с
Аэродинамическое сопротивление участка «рабочая зона № 1»	0,4475 Н·с <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>
Начальная частота вращения рабочего колеса ГВУ № 1	500 об/мин
Фактическое значение количества воздуха, подаваемого на проветривание рабочей зоны № 2	140,4 м <sup>3</sup> /с
Требуемое значение количества воздуха, подаваемого на проветривание рабочей зоны № 2	65 м <sup>3</sup> /с
Аэродинамическое сопротивление участка «рабочая зона № 2»	0,4614 Н·с <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>
Начальная частота вращения рабочего колеса ГВУ № 2	500 об/мин

На основании выполненного расчета определены оптимальные режимы работы ГВУ № 1 и ГВУ № 2, а также обеспечены воздухом рабочие зоны № 1 и № 2. Результаты расчета показаны на рисунках 4.4 и 4.5.

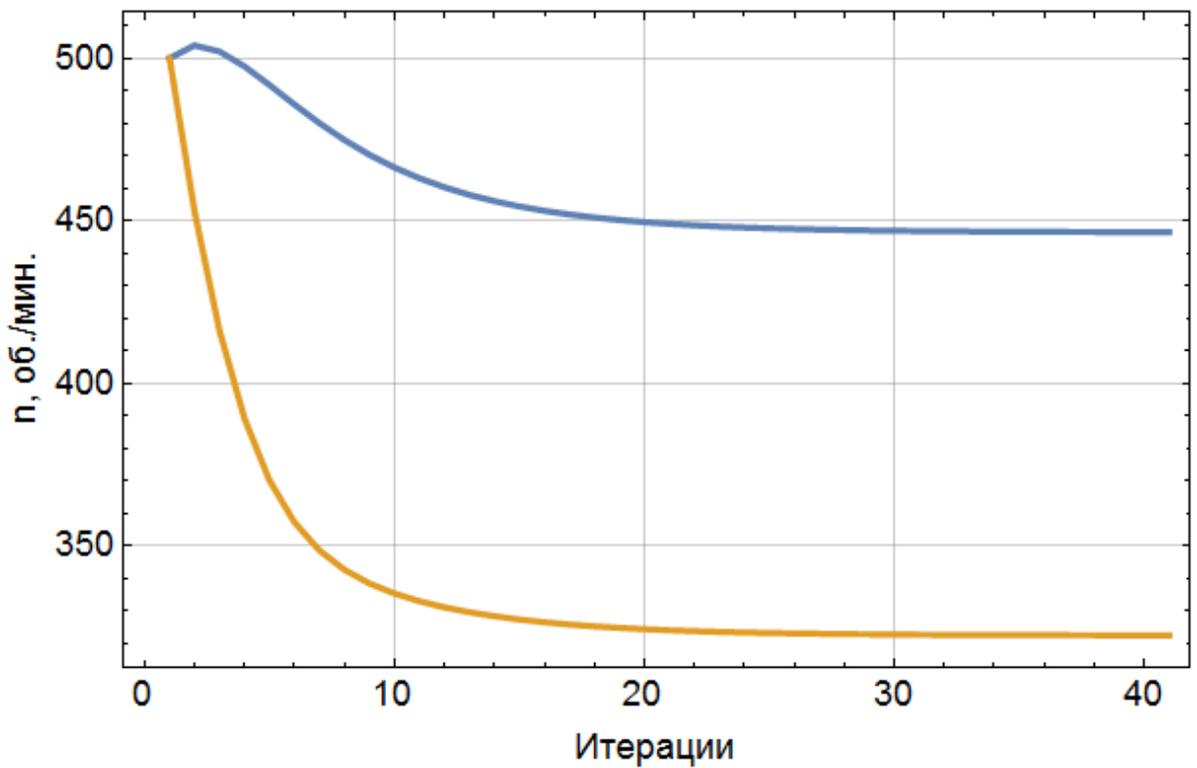


Рисунок 4.4 — Результаты работы алгоритма оптимизации режимов работы ГВУ

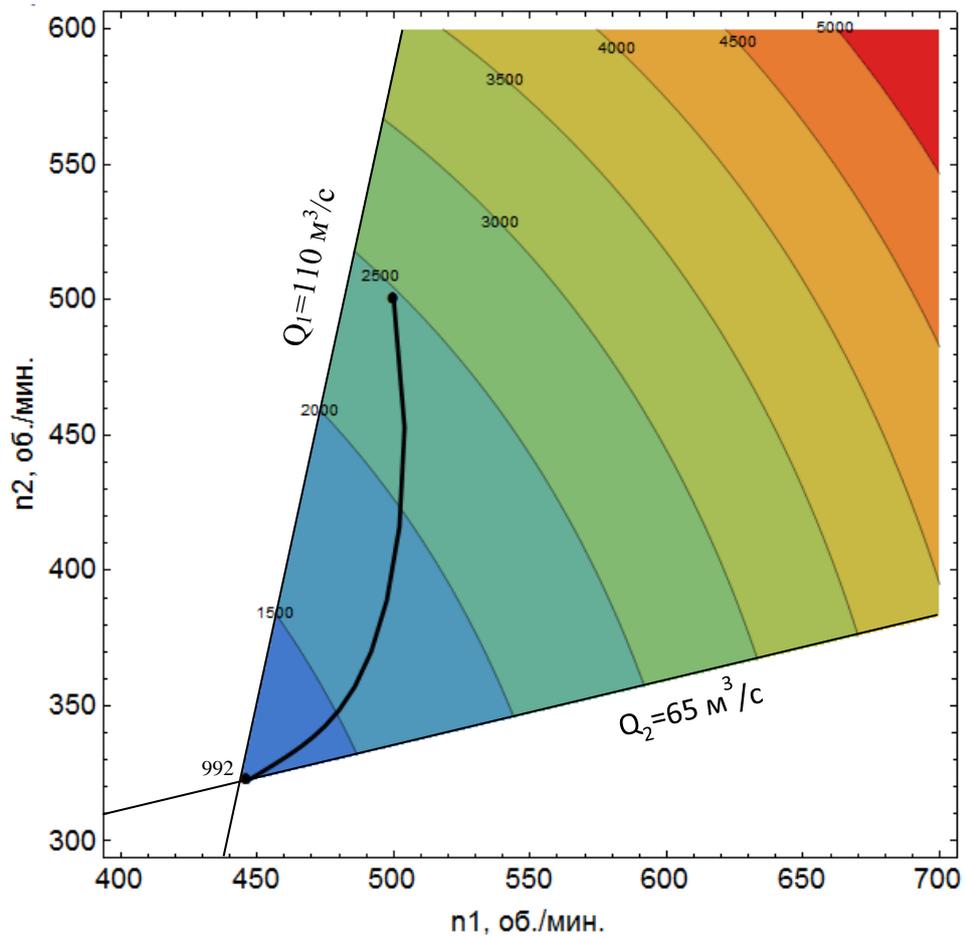


Рисунок 4.5 — Результаты расчета оптимизации режимов работы ГВУ

По результатам проведенных расчетов оптимизированы режимы работы главных вентиляторных установок для проветривания рабочих зон с требуемыми расходами воздуха по критерию минимизации потребляемой мощности.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет оптимизировать энергопотребление на проветривание рудников несколькими главными вентиляторными установками.

### **4.3 Выводы по главе**

Вследствие проведенных исследований, направленных на разработку способов оптимизации энергопотребления на проветривание рудников несколькими ГВУ, получены следующие результаты:

1. Проведен анализ влияния ГВУ и вентиляционных сооружений на проветривание участков вентиляционных сетей разветвленных и протяженных рудников со сложными системами вентиляции.
2. Разработан способ определения оптимальных параметров нескольких ГВУ и вентиляционных сооружений вентиляционной сети рудников.
3. Разработанный алгоритм определения оптимальных параметров нескольких ГВУ и вентиляционных сооружений вентиляционной сети рудников реализован в АК «АэроСеть».
4. Алгоритм определения оптимальных параметров нескольких ГВУ и вентиляционных сооружений верифицирован на простейших моделях вентиляционной сети рудников.

## **5. Методические основы автоматизированного проектирования энергоэффективных систем проветривания рудников со сложными системами вентиляции**

Интенсивное развитие горных работ в современных рудниках приводит к усложнению топологии сетей горных выработок: увеличивается количество стволов и горизонтов, появляется большое количество диагональных соединений, суммарная протяженность горных выработок существенно возрастает.

Вследствие этого технологические схемы проветривания рудников становятся особенно сложными и включают в себя использование нескольких ГВУ, а также появляется необходимость в большом количестве средств отрицательного регулирования.

Задача совместной работы всех средств регулирования воздухораспределения является весьма сложной. Решить данную задачу можно двумя способами: автоматизированного проектирования и опытным. При этом второй способ может быть не оптимальным по причине нерационального подбора параметров систем рудничной вентиляции.

В основу автоматизированного проектирования энергоэффективных режимов проветривания рудников со сложными системами вентиляции входит разработка:

- методики создания корректных расчетных математических моделей вентиляционных сетей рудников;
- специализированных алгоритмов для аналитического комплекса «АэроСеть», которые позволяют автоматизировать процесс построения моделей вентиляционных сетей и оптимизировать параметры систем рудничной вентиляции в процессе моделирования;
- программного обеспечения для оптимизации параметров систем рудничной вентиляции по критерию минимизации потребляемой мощности.

## **5.1 Методика построения математической модели расчетной вентиляционной сети рудников в аналитическом комплексе «АэроСеть»**

Математическая модель вентиляционной сети рудника — это упрощенное изображение сети горных выработок рудника, обладающее геометрическими и аэродинамическими параметрами, предназначенное для моделирования воздухораспределения. Математическая модель вентиляционной сети состоит из множества  $v$  узлов и соединяющих их  $e$  ветвей (горных выработок).

В данном разделе приведена методика построения математических моделей расчетных вентиляционных сетей рудников в АК «АэроСеть» [8].

1. Построение модели вентиляционной сети по проектным данным (задание проектных геометрических параметров и справочного коэффициента аэродинамического сопротивления).
2. Проведение воздушно-депресссионной съемки (ВДС) рудника.
3. Автоматизированная обработка данных ВДС (увязывание давлений и расходов воздуха).
4. Определение аэродинамических сопротивлений горных выработок.
5. Пополнение модели параметрами источников тяги и ее верификация (сравнение модельного распределения расходов с замеренным).

### **5.1.1 Построение модели вентиляционной сети по проектным данным**

Первый этап работы характеризуется построением топологии вентиляционной сети в соответствии с погоризонтными и аксонометрическими планами горных выработок. Топология вентиляционной сети состоит из множества ветвей и узлов, каждый из которых обладает определенными свойствами.

Ветви характеризуют горные выработки и в них задаются следующие характеристики:

- проектные длины ( $L_j$ ), м;
- проектные площади поперечного сечения ( $S_j$ ), м<sup>2</sup>;

- справочные коэффициенты аэродинамического сопротивления ( $\alpha_j$ ), кг/м<sup>3</sup>.

Ветви между собой соединяются узлами и в них задаются:

- значения высотных отметок (глубины узлов относительно поверхности), м;
- наличие связей с атмосферой.

На основании проектных геометрических параметров горных выработок и справочных коэффициентов аэродинамического сопротивления рассчитываются проектные значения аэродинамических сопротивлений

$$R_j = \alpha_j \cdot \frac{P_j \cdot L_j}{S_j^3}. \quad (5.1)$$

Проектных и справочных данных достаточно для проектирования вентиляции новых рудников.

В процессе развития горных работ на рудниках и шахтах аэродинамическое сопротивление горных выработок меняется [50] в связи с изменением шероховатости стенок и сечения выработок в результате их захламления и загромождения.

Для действующих рудников модели вентиляционных сетей корректируются данными проведенной воздушно-депресссионной съемки: расходами воздуха, давлениями, расположением вентиляционных сооружений и их параметрами.

### **5.1.2 Проведение воздушно-депресссионной съемки рудника**

При условии развития горных работ проектирование вентиляции действующих рудников осуществляется с учетом корректировки проектных аэродинамических сопротивлений горных выработок с учетом их изменения во времени. Для этого проводится воздушно-депресссионная съемка рудника - ВДС. Основной целью проведения ВДС является определение распределения расходов воздуха и давлений в горных выработках для расчета их действительных аэродинамических сопротивлений.

В связи с нестационарностью вентиляционной сети требуется ежедневно контролировать соблюдение одного и того же режима проветривания рудника, а

также проводить контрольные замеры давлений и расходов воздуха в заранее выбранных местах. Замеры скорости движения воздушного потока производятся в выработках околоствольного двора, где проходит наибольшее количество воздуха.

Кроме того, необходимо учитывать изменение атмосферного давления на протяжении всей воздушно-депресссионной съемки. Для этого на поверхности устанавливается стационарный цифровой барометр DPI-740, подключенный к компьютеру и фиксирующий изменение давления в данной точке через заданный промежуток времени.

При проведении воздушно-депресссионной съемки необходимо выбрать оптимальный маршрут и рациональное количество мест выполнения замеров (замерных станций).

В ходе выполнения воздушно-депресссионной съемки производятся замеры геометрических параметров (длина и площадь поперечного сечения) горных выработок, аэро- и термодинамических параметров (скорость, давление, температура и влажность) воздушного потока в узлах и ветвях рудничной вентиляционной сети. Кроме того, осуществляется измерение производительности и напора источников тяги (ГВУ и вспомогательных вентиляторов), а также параметры вентиляционных сооружений.

Далее результаты проведенных замеров заносятся в модель вентиляционной сети, построенную по проектным данным, и увязываются с помощью алгоритма обработки данных ВДС.

### **5.1.3 Автоматизированная обработка данных воздушно-депресссионной съемки**

Процесс автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки состоит из автоматического увязывания расходов воздуха и последующего автоматического увязывания давлений в модели вентиляционной сети рудника.

Таким образом, математическая модель вентиляционной сети, разработанная по проектным и справочным данным, пополняется замеренными расходами воздуха.

Далее алгоритм увязывания расходов на основании проектных аэродинамических сопротивлений и экспериментальных значений количества воздуха автоматически определяет распределение расходов воздуха. Увязывание замеренных значений расходов воздуха производится в соответствии с первым законом Кирхгофа. Полученные результаты расчета используются в качестве исходных данных для алгоритма определения давлений.

Прежде чем переходить к автоматическому увязыванию давлений, необходимо провести предварительную обработку экспериментальных замеров. Замеренные давления корректируются с учетом изменения атмосферного давления и гидростатического сжатия воздуха при опускании его на глубину.

Далее алгоритмом увязывания давлений на основании распределенных расходов воздуха, проектных аэродинамических сопротивлений и замеренных давлений автоматически определяется распределение давлений в вентиляционной сети. Увязывание замеренных значений давлений воздуха осуществляется согласно второму закону Кирхгофа.

В главе 2 подробно представлен алгоритм автоматизированной обработки замеренных давлений и расходов воздуха в вентиляционных сетях разветвленных рудников. Предложенный алгоритм позволяет корректно определять распределение расходов воздуха, давлений и аэродинамических сопротивлений горных выработок.

#### **5.1.4 Определение аэродинамических сопротивлений горных выработок**

По результатам автоматизированной обработки данных воздушно-депрессионной съемки определяются аэродинамические сопротивления горных выработок. Однако полученные сопротивления включают в себя

аэродинамические сопротивления горных выработок и аэродинамические сопротивления всех вентиляционных сооружений.

При проектировании новых участков в вентиляционной сети необходимо выделять отдельно сопротивления горных выработок и вентиляционных сооружений для разработки правильных технических решений по повышению эффективности проветривания рудников.

Алгоритм подбора сопротивлений, реализованный в АК «АэроСеть», позволяет в местах установки вентиляционных сооружений выделить из общего аэродинамического сопротивления горных выработок (полученных по результатам автоматизированной обработки данных ВДС) проектные аэродинамические сопротивления горных выработок, тогда оставшаяся величина сопротивления будет аэродинамическим сопротивлением вентиляционного сооружения.

Остальным горным выработкам присваивается аэродинамическое сопротивление, полученное на основании результатов автоматизированной обработки воздушно-депресссионной съемки (глава 2).

### **5.1.5 Пополнение модели параметрами источников тяги и ее верификация**

Далее математическая модель пополняется параметрами источников тяги (частота вращения рабочего колеса, угол установки лопаток), после этого производится расчет стационарного воздухораспределения.

В завершении необходимо верифицировать модель вентиляционной сети. Для этого требуется сравнить модельное воздухораспределение с фактически замеренными расходами воздуха.

При этом если полученные результаты воздухораспределения соответствуют расходам рудничного воздуха в выработках, модель признается корректной. Далее построенная модель позволит разрабатывать наиболее эффективные и экономически выгодные технические решения по проветриванию отдельных участков и рудника в целом.

Корректная модель вентиляционной сети рудника позволяет избежать ошибок при проектировании вентиляции рудника, оценивать возникновение потенциальных проблем при проветривании рудника и предусматривать пути их решения.

## **5.2 Разработка модуля оптимизации параметров сложных систем рудничной вентиляции в АК «АэроСеть» по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности**

Для автоматизированного проектирования оптимальных параметров систем рудничной вентиляции по критерию минимизации потребляемой мощности разработан алгоритм оптимизации параметров ГВУ и вентиляционных сооружений. Разработанный алгоритм реализован в виде расчетного модуля в аналитическом комплексе «АэроСеть».

Расчетный модуль оптимизации параметров систем рудничной вентиляции позволяет проводить моделирование воздухораспределения при проектировании вентиляции новых рудников, новых участков, прирезаемых к эксплуатируемым рудникам, а также рассчитывать оптимальные параметры каждой из главных вентиляторных установок и каждого из вентиляционных сооружений по критерию минимизации потребляемой мощности.

Основными достоинствами являются отсутствие ограничений на сложность топологии модели вентиляционной сети и отсутствие ограничений на количество, используемых в расчете главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений.

Время расчета оптимальных параметров систем рудничной вентиляции конкретного рудника или шахты определяется их сложностью, а также интенсивностью регулирования параметров ГВУ и вентиляционных сооружений.

На рисунке 5.1 представлены расчетные модули для решения задач рудничной вентиляции.

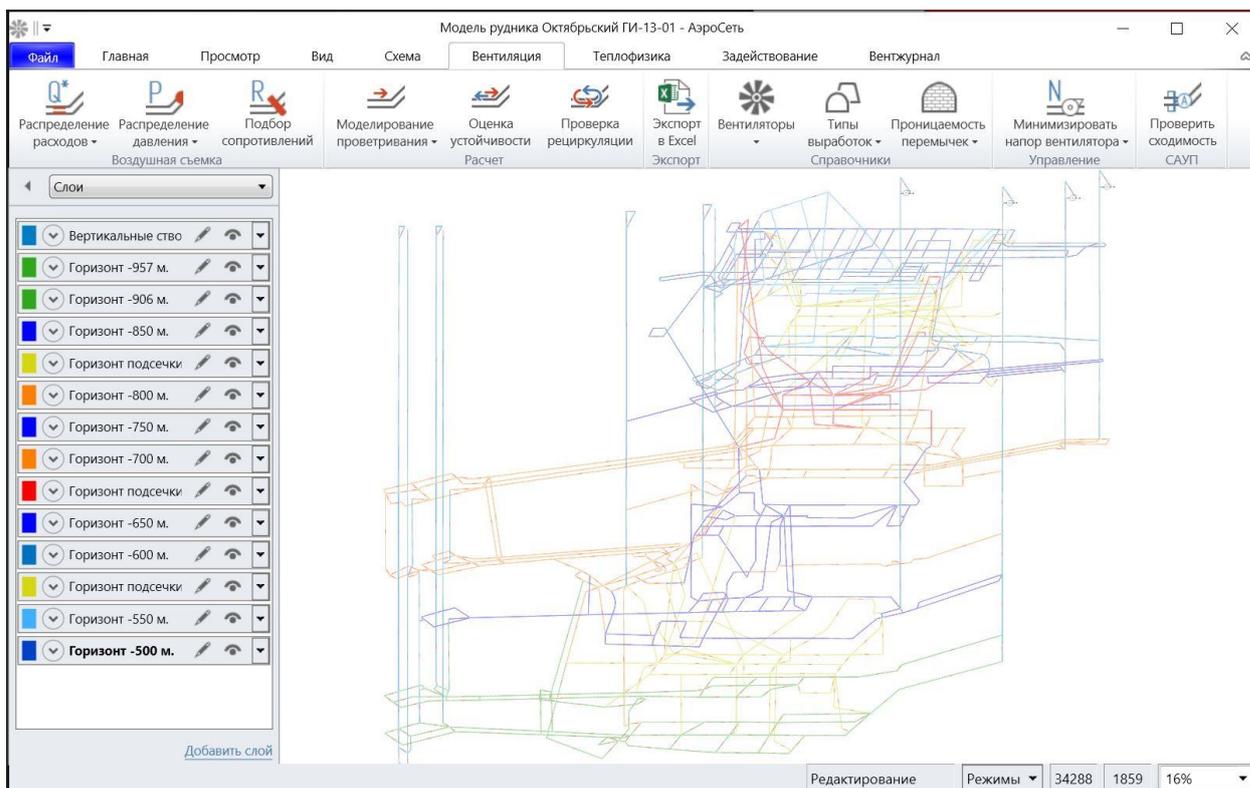


Рисунок 5.1 — Рабочее окно АК «АэроСеть» для решения задач рудничной вентиляции

Для автоматизированного проектирования и оптимизации параметров систем рудничной вентиляции в ветвях модели вентиляционной сети устанавливаются главные вентиляторные установки и вентиляционные сооружения. Кроме того, задаются начальные параметры их работы и требуемые значения воздуха, к которым будет стремиться алгоритм. Следует отметить, что в процессе расчета алгоритм позволяет стремиться к получению наиболее энергоэффективного решения.

Параметры расчета оптимизации ГВУ и вентиляционных сооружений задаются в окнах расчетного модуля, показанного на рисунках 5.2 и 5.3, соответственно.

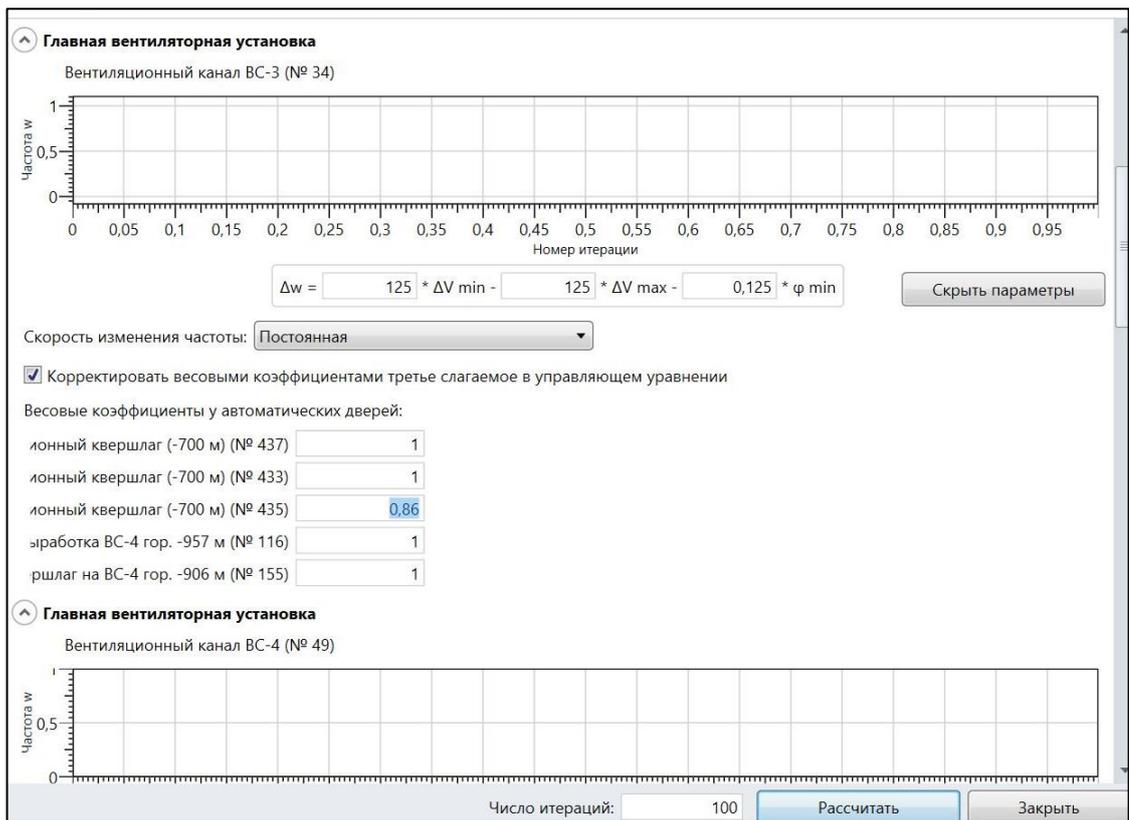


Рисунок 5.2 — Параметры расчета оптимизации ГВУ

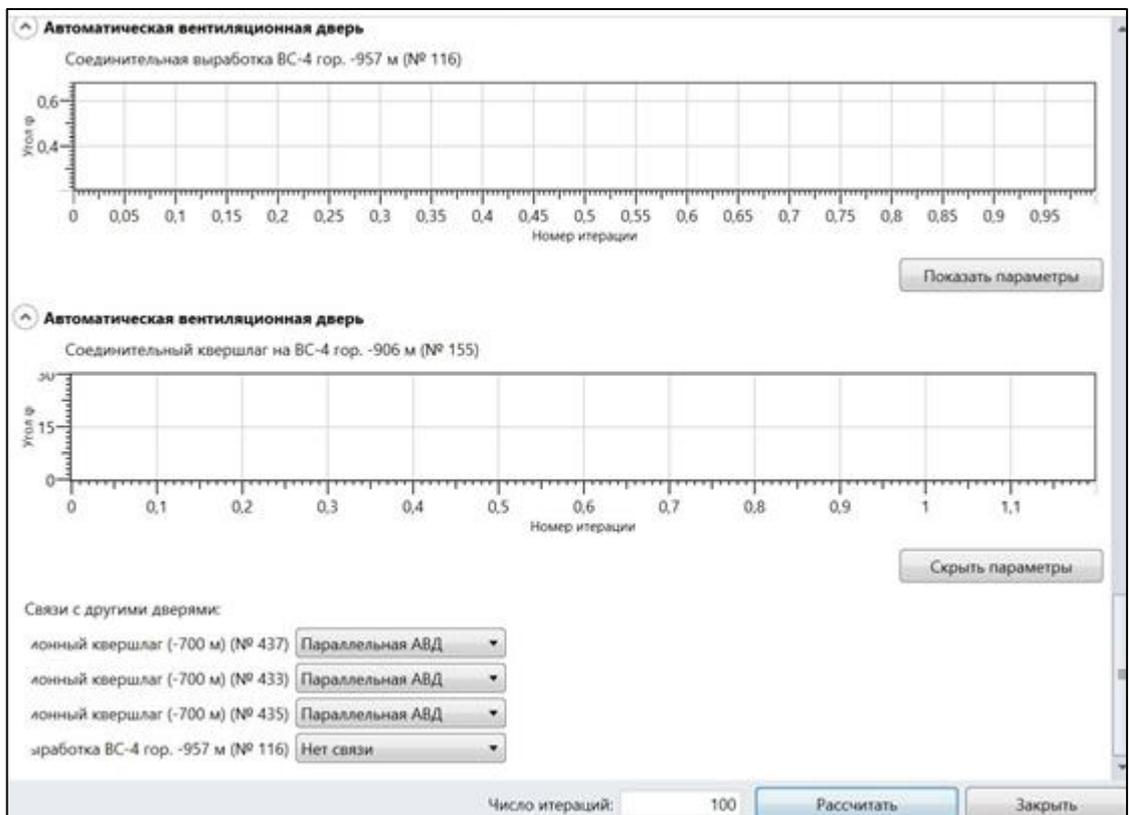


Рисунок 5.3 — Параметры расчета оптимизации вентиляционных сооружений

Результаты расчета оптимальных параметров проектирования систем вентиляции представлены непосредственно в рабочем окне модуля (рис. 5.4).

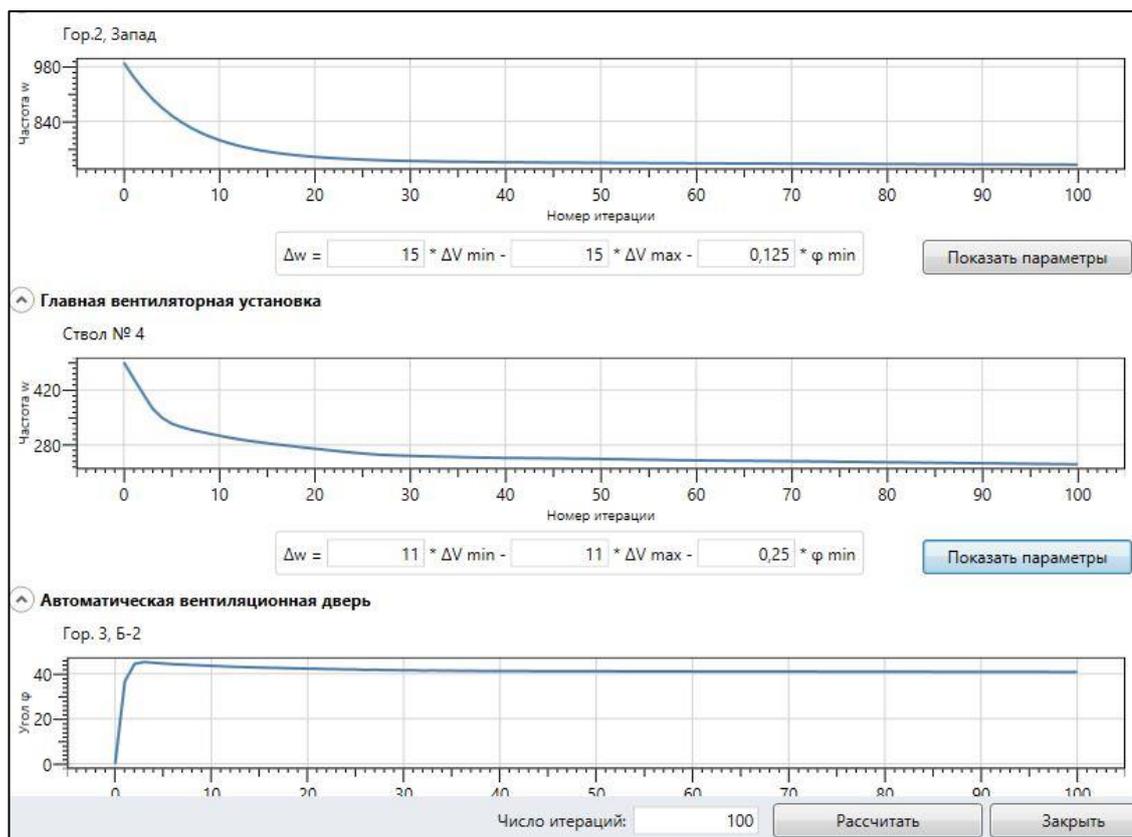


Рисунок 5.4 — Полученные результаты расчета

Разработанный и реализованный в программном комплексе АК «АэроСеть» модуль позволяет решать задачи проектирования сложных систем рудничной вентиляции с несколькими главными вентиляторными установками и вентиляционными сооружениями.

Кроме того, данный модуль позволяет на стадии проектирования определять ненужные вентиляционные сооружения, тем самым, исключая фактор разной квалификации проектировщиков.

### 5.3 Повышение энергоэффективности сложных систем вентиляции рудников на основе автоматизированного проектирования проветривания

Решение задачи повышения энергоэффективности сложных систем вентиляции рудников на основе автоматизированного проектирования

проветривания рассмотрено на примере рудника «Октябрьский» ПАО ЗФ «ГМК «Норильский Никель» и рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий».

Шахтное поле рудника «Октябрьский» вскрыто 11 вертикальными стволами. Стволы между собой соединены 13 горизонтами (откаточными, подсечными и вентиляционно-закладочными), расположенными на разных высотных отметках. Кроме того, горизонты соединены между собой горизонтальными и наклонными аэродинамическими связями. Рудник проветривается всасывающим способом по фланговой схеме четырьмя главными вентиляторными установками, параметры которых подобраны опытным путем.

Повышение энергоэффективности системы вентиляции рудника «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель» на разных этапах развития зависит от правильно принятых проектных решений: рационально подобранных параметров главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений.

Основными исходными данными для автоматизированного проектирования системы вентиляции рудника «Октябрьский» являются:

- расчетная модель вентиляционной сети рудника, разработанная по данным воздушно-депресссионной съемки;
- фактические параметры ГВУ и вентиляционных сооружений.

На руднике «Октябрьский» проведена воздушно-депресссионная съемка, по результатам которой разработана расчетная модель вентиляционной сети. Топология актуальной модели представлена на рисунке 2.7. Методика разработки расчетной математической модели представлена в разделе 5.1.

В соответствии с «Методикой ...» [57] выполнен расчет требуемого количества воздуха, необходимого для проветривания рудника «Октябрьский» на момент проведения воздушно-депресссионной съемки.

На основании проведенного анализа вентиляционной сети рудника «Октябрьский» можно сделать вывод, что наиболее рациональным способом регулирования воздухораспределения рудника является регулирование главными вентиляторными установками. Данный факт связан с тем, что в условиях рудника используется большое количество технологического транспорта, который

перемещается в пределах всего рудника. Поэтому возможность регулирования воздухораспределения вентиляционными сооружениями ограничена.

Далее проведены расчеты по повышению энергоэффективности проветривания рудника «Октябрьский».

В таблице 5.1 представлены полученные результаты двух режимов работы главных вентиляторных установок:

Режим 1 — существующий, параметры ГВУ подобраны опытным путем.  
Параметры работы ГВУ: ГВУ-1 — 270 об/мин, ГВУ-2 — 360 об/мин, ГВУ-3 — 390 об/мин, ГВУ-4 — 270 об/мин.

Режим 2 — расчет энергоэффективного режима работы всех главных вентиляторных установок путем оптимизации параметров ГВУ для минимизации потребляемой мощности.

Параметры работы ГВУ: ГВУ-1 — 318 об/мин, ГВУ-2 — 319 об/мин, ГВУ-3 — 322 об/мин, ГВУ-4 — 319 об/мин.

Кроме того, проведены расчеты совместной оптимизации параметров ГВУ и вентиляционных сооружений для минимизации суммарной потребляемой мощности вентиляторных установок. Вентиляционные двери установлены на откаточных квершлагах в количестве 11 штук. Результаты сравнения расчетов оптимизации параметров ГВУ и совместной оптимизации параметров вентиляционных сооружений и главных вентиляторных установок показали, что разница между этими двумя режимами составляет менее 0,5 %.

Таблица 5.1 — Сравнительная характеристика проветривания рудника «Октябрьский» с фактическими параметрами работы ГВУ и параметрами работы ГВУ, подобранными с помощью разработанного алгоритма оптимизации

Параметры	Режим 1	Режим 2
Расчетное количество воздуха, необходимого для проветривания рудника, м <sup>3</sup> /мин	78300	
Фактическое (модельное) количество воздуха, подаваемого в рудник, м <sup>3</sup> /мин	82302	82338
Суммарная потребляемая мощность	5764	4974

ГВУ, кВт		
Энергозатраты в год, кВт·ч	50492640	43572240
Экономия энергозатрат на проветривание рудника в год, кВт·ч	—	6920400
Экономия энергозатрат на проветривание рудника в год, %	—	13,7
Экономия финансовых затрат на проветривание рудника в год*, руб.	—	6159156

\* — стоимость рублей одного кВт·ч для Норильского региона, 0,89 руб.

В таблице 5.1 приведена сравнительная характеристика проветривания рудника «Октябрьский» с фактическими параметрами работы ГВУ и параметрами работы ГВУ, подобранными с помощью разработанного алгоритма оптимизации.

В качестве второго примера рудника со сложной системой вентиляции приведен рудник 4 РУ ОАО «Беларуськалий». Шахтное поле рудника вскрыто 6 вертикальными стволами. Горные работы ведутся на двух горизонтах, расположенных на разных высотных отметках. Проветривание рудника осуществляется всасывающим способом пятью главными вентиляторными установками, среди которых две находятся на поверхности и три — под землей.

В условиях рудника 4 РУ проведена воздушно-депресссионная съемка. По результатам разработана детализированная модель. Проведенный анализ работы главных вентиляторных установок показал, что не все вентиляторы работают эффективно. Во-первых, количество воздуха, подаваемого в рудник, превышает расчетное значение. Во-вторых, поверхностный вентилятор, расположенный в поверхностном комплексе ствола 3, не влияет на проветривание рудника. Перераспределение воздуха в горных выработках рудника осуществляется автоматическими вентиляционными дверьми.

В таблице 5.2 представлены результаты расчетов двух режимов работы главных вентиляторных установок:

Режим 1 — существующий, параметры ГВУ подобраны опытным путем.

Режим 2 — предлагаемый, режим подобран с использованием алгоритма оптимизации параметров ГВУ.

Таблица 5.2 — Сравнительная характеристика проветривания рудника 4 РУ с фактическими параметрами работы ГВУ и параметрами работы ГВУ, подобранными с помощью алгоритма оптимизации

Параметры	Режим 1	Режим 2
Расчетное количество воздуха, необходимого для проветривания рудника, м <sup>3</sup> /мин	27585	
Фактическое (модельное) количество воздуха, подаваемого в рудник, м <sup>3</sup> /мин	33618	28615
Суммарная потребляемая мощность ГВУ, кВт	1720	1351
Энергозатраты в год, кВт·ч	15067200	11834760
Экономия энергозатрат на проветривание рудника в год, кВт·ч	—	3232440
Экономия энергозатрат на проветривание рудника в год, %	—	21,4
Экономия финансовых затрат на проветривание рудника в год*, руб.	—	13188355

\* — стоимость рублей одного кВт·ч для Республики Беларусь, 4,08 руб.

При непрерывном ведении горных работ топология вентиляционной сети усложняется, вследствие этого возникает необходимость своевременно корректировать производительность главных вентиляторных установок. Это обусловлено факторами подачи требуемого количества воздуха и минимизацией энергозатрат на проветривание.

На основании таблиц 5.1 и 5.2 можно сделать вывод, что использование алгоритма оптимизации позволит своевременно подбирать наиболее рациональные режимы совместной работы главных вентиляторных установок и экономить электроэнергию.

Основное преимущество использования разработанных способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции появляется за счет определения режимов совместной работы нескольких главных вентиляторных установок, при этом возникает возможность выбора рабочей точки дополнительной главной вентиляторной установки в зоне

высокого коэффициента полезного действия при проектировании и эксплуатации рудников.

#### **5.4 Выводы по главе**

По результатам проведенных исследований, направленных на разработку методических основ автоматизированного проектирования энергоэффективных режимов проветривания рудников со сложными системами вентиляции, можно сделать выводы:

1. Разработанная методика построения математической модели расчетной вентиляционной сети по данным воздушно-депресссионной съемки применима для рудников и шахт различной глубины и сложности топологии.
2. Разработанный и реализованный модуль оптимизации параметров систем рудничной вентиляции позволяет при использовании нескольких ГВУ минимизировать суммарную потребляемую мощность главных вентиляторных установок.
3. На основании математической модели вентиляционной сети рудника и определенного требуемого количества воздуха, необходимого для проветривания участков и рудника в целом, можно производить автоматизированное проектирование систем рудничной вентиляции рудников любой сложности с выбором рациональных схем проветривания и параметров главных вентиляторных установок.
4. Разработаны рекомендации по снижению суммарного энергопотребления главных вентиляторных установок рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель». На основании требуемого количества воздуха, необходимого для проветривания участков и рудника в целом, выбраны места установки вентиляционных сооружений, и оптимизированы параметры вентиляционных сооружений и параметры работы ГВУ с учетом совместной работы.

## Заключение

В диссертационной работе представлено решение научно-практической задачи разработки способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции на основе многовариантного численного моделирования аэродинамических процессов и создания способа совместной оптимизации параметров систем рудничной вентиляции с целью использования его для разработки энергосберегающих решений. При этом получены следующие основные научные результаты:

1. Автоматизирован процесс обработки данных воздушно-депресссионной съемки путем разработки и реализации алгоритмов автоматического увязывания расходов воздуха и давлений в программно-вычислительном комплексе.
2. Разработан и верифицирован алгоритм автоматизированной обработки результатов измерений воздушно-депресссионной съемки, проведенной в руднике «Октябрьский».
3. На основании проведенных теоретических исследований и результатов анализа экспериментальных данных усовершенствован и верифицирован метод проведения экспериментальных исследований для определения реальных аэродинамических сопротивлений шахтных стволов.
4. Разработан алгоритм оптимизации параметров каждого из совместно работающих нескольких главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений в вентиляционных сетях рудников по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности.
5. Разработаны программно-методические средства для повышения энергоэффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции на основе использования усовершенствованных методов построения моделей вентиляционных сетей и метода оптимизации параметров главных вентиляторных установок.

6. Проведены экспериментальные исследования распределения аэродинамических и термодинамических параметров воздуха, а также факторов, влияющих на определение аэродинамических сопротивлений шахтных стволов рудников «Октябрьский» и «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель», которые подтвердили достоверность усовершенствованного метода.
7. Произведено построение модели вентиляционной сети рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» с использованием способа автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки и методики определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов. На основе этой модели с помощью алгоритма оптимизации параметров главных вентиляторных установок подобраны наиболее энергоэффективные режимы их работы.

### Список использованных источников

- 1 Абрамов Ф.А. Рудничная аэрогазодинамика. — М.: Недра, 1972. — с. 272.
- 2 Абрамов Ф.А., Бойко В.А. Автоматизация проветривания шахт. Киев: Науковая думка, 1967.
- 3 Абрамов Ф. А., Долинский В. А., Идельчик И. Е. и др. Аэродинамическое сопротивление горных выработок и тоннелей метрополитена. М.: Недра, 1964.
- 4 Абрамов Ф. А., Тяг Р. Б., Потемкин В. Я. Воздухораспределение в вентиляционных сетях шахт. Киев: Наук. Думка, 1971.
- 5 Абрамов Ф.А., Тяг Р.Б., Потемкин В.Я. Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников. М.: Недра, 1978. — с. 232.
- 6 Автоматизированная обработка данных воздушно-депресссионной съемки для построения корректной математической модели вентиляционной сети рудников / Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Мальцев С.В., Семин М.А. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2016. — № 1. — с. 22—30.
- 7 Акутин К. Г., Филиппович Е. И., Шойхет Л. А. Управление воздухораспределением в шахтной вентиляционной сети. М.: Недра, 1977.
- 8 Аналитический комплекс «АэроСеть». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: свид. №2015610589. / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН — №2014613790 заявл. 24.04.2014; опублик. 14.01.2015, Реестр программ для ЭВМ. — 1 с.
- 9 Аэрогазодинамика очистных участков шахт и рудников / Качурин Н.М., Стась Г.В., Мохначук И.И., Поздеев А.А. // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: сб. трудов конференции. — Пермь, 2014. — С. 381—386.
- 10 Аэродинамика местных сопротивлений. Труды Института им. Н.Е. Жуковского, 1935. — вып. 211.
- 11 Аэродинамические режимы работы систем вентиляции подготовительных выработок / Качурин Н.М., Стась Г.В., Качурин А.Н., Стась В.П. // Известия

Тулского государственного университета. Науки о Земле. — 2018. — №3. — С. 85—93.

12 Богословский В.Н. Отопление и вентиляция / Богословский В.Н. — Часть II. — М.: Стройиздат, 1976. — с. 512.

13 Бурчаков А.С., Мустель П.И., Ушаков К.З. Рудничная аэрология. — М.: Недра, 1971. — с. 376.

14 Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. — с. 576.

15 Волков А.А. Постановка задачи оптимального управления проветриванием шахт // Механизация и автоматизация проветривания шахт. Киев, Наукова думка, 1965.

16 Волков А.А., Дедиков Э.В., Евдокимов А.Г., Яловкин Б.Д. О решении на ЭВМ определенного класса задач по регулированию воздухораспределения в шахтных вентиляционных сетях. — Приборы и системы автоматики, 1966, вып. 3, с. 146—153.

17 Волков А.А., Евдокимов А.Г., Яловкин Б.Д. Анализ задачи оптимального управления воздухораспределением в шахтных вентиляционных сетях // Технологии и экономика угледобычи. 1965, № 6, с. 63—65.

18 Воронин В.Н. Основы рудничной аэрогазодинамики. — М.: Углетехиздат, 1951. — с. 492.

19 Гипроуголь — Вентиляция шахт [Офиц. сайт]. URL: <http://www.giprougol.ru/technologies/software/ventsh> (дата обращения: 9.08.2016).

20 Горбунов В.И. Проектирование вентиляции рудных шахт. Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2007. — с. 135.

21 Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке (методы планирования эксперимента). М.: Мир, 1981. — с. 448.

22 Долинский В.А., Шейченко В.И. Исследование аэродинамических параметров горных выработок при завалах. — В кн.: Физ.-техн. проблемы упр. воздухообменом в горн. выработках бол. объемов. Всесоюзный научно-технический симпозиум, Кохтла-Ярве, 27-30 июня 1983 г. Тез. докл. Л.:Б.и., 1983, с. 95.

23 Ивановский И.Г. Шахтные вентиляторы. — Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. — с. 196

24 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. / Под ред. М.О. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1992. — с. 672.

25 Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Мальцев С.В. Особенности определения аэродинамических сопротивлений глубоких шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2013. — № 12. — с. 164—168.

26 Казаков Б.П., Мальцев С.В., Семин М.А. Обоснование участков измерения аэродинамических параметров воздушного потока при определении аэродинамического сопротивления стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № S7. — с. 69—75.

27 Казаков Б.П., Шалимов А.В., Стукалов В.А. Моделирование аэродинамических сопротивлений сопряжений горных выработок / Горный журнал. — 2009. — № 12. — с. 56—58.

28 Кашибадзе В.В. Аэродинамическое сопротивление горных выработок. — М.: Недра, 1983. — с. 152.

29 Комаров В. Б., Килькеев Ш. Х. Рудничная вентиляция. М.: Недра, 1969.

30 Козырев С.А., Осинцева А.В. Автоматизация проектирования вентиляции подземного рудника / Вестник МГТУ. — 2009. — т. 12, № 4. — с.677—682.

31 Комплекс программ для автоматизированных расчетов (САПР ВС) при проектировании и организации вентиляции подземных рудников / Козырев С.А., Вассерман А.Д., Осинцев В.В., Осинцева А.В. // Инновационные технологии и современные методы инженерного обеспечения горно-обогатительного производства: сб. инновационных проектов. — Апатиты: КНЦ РАН; СПб, 2010. — с. 14—16.

32 Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников. — Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 1992. — с. 250.

33 Кобылкин С.С. Моделирование аэрогазодинамических процессов вентиляции шахт и рудников при проектировании // Сборник: «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр»: Материалы XI международной конференции. — 2012. — с. 266 — 268.

34 Кобылкин С.С., Сологуб О.В. Обзор существующих средств программного обеспечения для моделирования вентиляции подземных сооружений и шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2009. — № S13. — с. 115—132.

35 Кобылкин С.С. Системное проектирование вентиляции горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № S1. — С. 150—156.

36 Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. — Мн.: Издательство БГУ, 1982. — с. 302.

37 Круглов Ю.В. Моделирование систем оптимального управления воздухораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников: дисс. канд. техн. наук. — Пермь, 2006. — с. 170.

38 Круглов Ю.В. Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: дисс. д-р. тех. наук. — Пермь: 2012. — с. 341.

39 Круглов Ю.В., Газизуллин Р.Р. Использование CFD-методов при исследовании аэрогазодинамических процессов в рудничной атмосфере // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2011. — № 4. — с. 211—213.

40 Круглов Ю. В., Исаевич А. Г., Левин Л. Ю. Сравнительный анализ современных алгоритмов расчета вентиляционных сетей // Изв. вузов. Горный журнал. — 2006. — № 5. — с. 32—37.

41 Круглов Ю. В., Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2011. — № 5. — с. 101 — 109.

42 Ксенофонтова А.И. Сборник задач по рудничной вентиляции. — М.: Углетехиздат, 1954. — с. 347.

43 Ксенофонтова А.И., Карпухин В.Д., Харев А.А. Вентиляционное сопротивление горных выработок. — М.: Углетехиздат, 1950. — с. 240.

44 Левин Л.Ю. Исследование и разработка ресурсосберегающих систем воздухоподготовки для рудников: дисс. канд. техн. наук. — Пермь: 2004. — с. 143.

45 Левин Л.Ю., Газизуллин Р.Р., Зайцев А.В. Использование программного модуля ANSYS CFX при решении научно-производственных задач проветривания шахт и рудников // САПР и графика. — 2011. — № 10. — с. 64—66.

46 Левин Л.Ю., Газизуллин Р.Р., Зайцев А.В. Современные тенденции в области минимизации местных аэродинамических сопротивлений в рудничных вентиляционных сетях // «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках»: сборник докладов. Украина, Крым, Симферополь. — 2010.

47 Левин Л. Ю., Кормщиков Д. С., Семин М. А. Решение задачи оперативного расчета распределения продуктов горения в сети горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2013. — № 12. — с. 179—185.

48 Левин Л.Ю., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Разработка метода расчета местных аэродинамических сопротивлений при решении сетевых задач воздухораспределения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 9. — с. 200—206.

49 Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Определение перепада давления на сопряжении вентиляционного ствола и канала ГВУ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № 5. — с. 93—102.

50 ЛИ Телэй. Влияние аэродинамического старения горных выработок на надежность шахтной вентиляционной системы. Автореферат дисс. канд. техн. наук. — Москва: 2000. — с. 23.

51 Луговский С.И. Проветривание глубоких рудников. — М.: Госгортехиздат, 1962. — с. 323.

52 Мальцев С.В. Определение аэродинамических параметров стволов глубоких рудников на основании данных воздушно-депресссионной съемки // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2013. — Вып. 11. — с. 256—257.

53 Мальцев С.В., Казаков Б.П. Разработка методики проведения экспериментальных исследований по определению аэродинамических сопротивлений стволов глубоких рудников // Изд-во ПНИПУ (Пермь). — 2015. — с. 271 — 278.

54 Математические модели аэрогазодинамических процессов на очистных участках шахт и рудников / Качурин Н.М., Мохначук И.И., Поздеев А.А., Стась Г.В. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2013. — №1. — С. 267—276.

55 Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников. — Свердловск, УрО АН СССР, 1990. — с. 252.

56 Меренков А. П., Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. — с. 230.

57 Методика организации проветривания и расчета количества воздуха, необходимого для проветривания рудника «Октябрьский» ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» / ОАО «ГМК «Норильский никель», Институт горного дела СО РАН. Новосибирск, 2007.

58 Методические указания (пособие) по производству воздушно-депресссионных съемок и обработки их результатов на рудниках цветной металлургии СССР. Свердловск, 1980. — с. 160.

59 Милетич А.Ф. Контроль проветривания шахт. — М.: Углетехиздат, 1958. — с. 144.

60 Мохирев Н.Н. Разработка современных методов и средств обеспечения высокоэффективного проветривания рудников, обладающих малыми аэродинамическими сопротивлениями. — Автореферат дисс. докт. техн. наук. —

Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова, 1994. — с. 41.

61 Мохирев Н.Н., Лукьянов Н.Г. Коэффициент аэродинамического сопротивления выработок калийных рудников. — Вентиляция шахт и рудников. Л.: 1977. — Вып. 4. — с. 72-76.

62 Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. — М.: Недра, 2007. — с. 327.

63 Обоснование основных аэродинамических параметров вентиляционных сооружений марганцевых шахт / Голинько В.И., Кузьминов К.В., Лебедев Я.Я., Аворьска О.О. // Разработка рудных месторождений. — Научно-технический сборник, 2010. — Вып. 97. — с. 222-225.

64 Осинцева А.В. Оптимизация размещения регуляторов воздухораспределения в вентиляционной сети подземного рудника на основе анализа взаимосвязи параметров сети и применения генетического алгоритма: дисс. канд. техн. наук. — Апатиты, 2011. — с. 129.

65 Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / под ред. Ю.Ю. Тарасевича. — Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. — с. 87.

66 Прокопов А.Ю. Обоснование технологических и конструктивных решений по армированию глубоких вертикальных стволов. — Автореферат дисс. докт. техн. наук. — Новочеркасск: Новочеркасский политехнический институт, 2009. — с. 38.

67 Пучков Л.А., Бахвалов Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт. — М.: Недра, 1992. — с. 399.

68 Пучков Л.А., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Методология системного проектирования вентиляции шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № S1. — с. 128—136.

69 Разработка программно-вычислительного комплекса АэроСеть для расчета вентиляционных сетей шахт и рудников / Круглов Ю. В., Казаков Б. П., Левин Л. Ю., Исаевич А. Г. // Материалы международного научного симпозиума «Неделя

горняка — 2006». — М.: Изд-во Московского государственного горного университета. — 2006.

70 Расчет-обоснование вариантов воздухораспределения, по проектируемому участку и по руднику в целом, с обеспечением устойчивыми параметрами проветривания горных выработок в период увеличения производственной мощности рудника «Октябрьский» до 6550 тыс. тонн в год с учетом действующих и перспективных проектов. Отчет о НИР, Пермь — Норильск — Санкт-Петербург, 2012—2013. — с. 166.

71 Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. — Макеевка-Донбасс, 1989. — с. 320.

72 Руководство по производству депрессионных и газовых съемок в угольных шахтах. — Донецк: ВНИИГД, 1989. — с. 73.

73 Семин М.А. Численное моделирование аэродинамических процессов на участке сопряжения вентиляционного канала со стволом // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. Изд-во ПНИПУ (Пермь). — 2014. — № 1 — с. 419—422.

74 Семин М.А., Левин Л.Ю. Оптимизация геометрических параметров рудничных вентиляционных сетей // Материалы конференции «Горняцкая смена — 2015», Новосибирск, 2015.

75 Скачков М.С. Руководство по определению коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок на рудниках НГМК. — Норильск, 1988. — с. 27.

76 Скопинцева О.В. Ушаков К.З. Регулирование шахтных вентиляционных сетей по фактору аэродинамического старения горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 1997. — № 3. — с. 142 — 147.

77 Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. — М.: Углетехиздат, 1949. — с. 443.

78 Скочинский А.А., Ксенофонтова А.И., Харев А.А. и др. Аэродинамическое сопротивление шахтных стволов и способы его снижения. — М.: Углетехиздат, 1953. — с. 363.

79 Справочник по рудничной вентиляции. Под ред. К.З. Ушакова. — М.: Недра, 1988. — с. 440.

80 Сравнительная оценка приборов, используемых для проведения депрессионных съемок / Каледина Н.О., Мещеряков Д.А., Кобылкин С.С., Гашенко О.И. // Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 3. — с. 50—53.

81 Сыркин П.С., Мартыненко И.А., Прокопов А.Ю. Шахтное и подземное строительство. Ч.I Оснащение вертикальных стволов.: Учеб. пособие/Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. — Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000. — с. 300.

82 Тянь Р.Б., Потемкин В.Я. Управление проветриванием шахт. Киев: Наук. Думка, 1977.

83 Талиев В.Н. Расчет местных сопротивлений тройников. Центральный научно-исследовательский институт промышленных сооружений (ЦНИПС), научн. сообщ., вып. 9. Госстройиздат, 1952.

84 Управление вентиляционными режимами шахт и рудников регулированием воздухораспределения в сложных вентиляционных сетях / Лебедев Я.Я., Евстратенко И.А., Кривцун Г.П., Микрюков С.Б. // Научный вестник. — 2010. — №1. — с. 44-45.

85 Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И. Рудничная аэрология. — М.: Недра, 1978. — с. 440.

86 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, 2014. — с. 122.

87 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: утв. приказ Ростехнадзора от 19.11.2013 № 550, 2014. — с. 94.

- 88 Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. — Т. 1. — с. 505.
- 89 Харев А.А. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей. — М.: Углетехиздат, 1954. — с. 248.
- 90 Цой С.В. Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. Алма-Ата: Наука, 1975. — с. 366.
- 91 Цой С., Рязанцев Г. К. Принцип минимума и оптимальная политика управления вентиляционными и гидравлическими сетями. М.: Наука, 1968.
- 92 Цой С.В., Цхай С.М. Электронно-вычислительная техника в вентиляционной службе шахт. Алма-Ата: Наука, 1966. — с. 233.
- 93 Яворский В.А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных. — М.: Изд-во МФТИ: 2011 — с. 45.
- 94 ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 14.0. ANSYS, Inc. November 2011. — 768 p.
- 95 Brake D.J. Mine ventilation – a practitioner’s manual. — 686 p.
- 96 Bromilow J.G. The Estimation and Reduction of the Aerodynamic Resistance of mine shafts // Trans. Inst. Mining Engineers UK, 1960. Vol. 119. Part 8. P 449-465.
- 97 Cross H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. — University of Illinois Bul., 1936, v. 34, N 22, p. 3-33.
- 98 Jacques E., Patigny J. Flow determination in underground airways from small differential pressure measurements. — Mining Science and Technology, 1990, v.11, N 2, p.191—197.
- 99 Fletcher C.A.J. Computational Techniques for Fluid Dynamics: Fundamental and General Techniques, Vol.1 — Springer, 2nd ed. 1998, XIII, — 401 p.
- 100 Justus B. Deen. Field verification of shaft resistance equations// Proceedings of 5<sup>th</sup> US Mine Ventilation Symposium, 1991. — Chapter 81. — P. 647—655.
- 101 Hartman H. L. Mine ventilation and air conditioning, John Wiley & Sons, New York. — 1982. — 718 p.

102 Kempson W.J., Webber-Youngman R.C.W., Meyer J.P. Optimizing shaft pressure losses through computational fluid dynamics modelling // The Journal of The African Institute of Mining and Metallurgy, 2013. — Vol. 113. — P. 931—939.

103 Kirchhoff G. Ueber die Auflösung der Gleichungen, auf welche man bei Untersuchung der linearen Vertheilung, galvanische Ströme geführt wird. Leipzig; Annalen der Physik und Chemie (Poggendorf), Bd. 72, Vol. 12, — 1847. — pp. 497 — 508.

104 McPherson M.J. The resistance to airflow of mine shafts // Trans. 3<sup>rd</sup> US Mine Ventilation Symposium Penn, 1987. — State University. — P. 465-477.

105 McPherson M.J. An analysis of the resistance and airflow characteristics of mine shafts // Fourth International Mine Ventilation Congress, 1988. — Brisbane, Queensland.

106 Mohammadi B., Pironneau O., Analysis of the K-Epsilon turbulence model, New York: Wiley, 1994. — 194 p.

107 Prosser B.S., Wallace K.G. Practical Values of Friction Factors, Proceedings of the 8th US Mine Ventilation Symposium, Jerry C. Tien editor, 1999, pp. 691-696.

108 Ruckman R., Bowling J. Comparison of barometer pressure surveys with other measuring techniques for determining frictional pressure loss in shafts // 14<sup>th</sup> United States / North American Mine Symposium, 2012. — P. 23—29.

109 Ventsim — 3D Mine Ventilation Simulation Software [Офиц. сайт]. URL: <http://www.ventsim.com> (дата обращения: 14.12.2014).

110 Vuma Software [Офиц. сайт]. URL: <http://www.vuma.co.za> (дата обращения: 29.02.2016).