

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет МИСиС»
(НИТУ «МИСиС»)
Горный институт



на правах рукописи

Кобылкин Сергей Сергеевич

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ**

05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»

(в горной промышленности)

25.00.21 – «Теоретические основы проектирования горнотехнических систем»

диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант

профессор, доктор технических наук **Каледина Нина Олеговна**

Москва, 2018

Оглавление

Введение.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ И РУДНИКОВ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	15
1.1. Анализ текущего состояния и развития горнодобывающих предприятий Российской Федерации.....	18
1.2. Анализ состояния вентиляции шахт Российской Федерации	25
1.3. Анализ состояния вентиляции рудников Российской Федерации.....	33
1.4. Анализ степени опасности вентиляции шахт и рудников	38
1.5. Современные направления и проблемы развития рудничной вентиляции.....	42
1.6. Нормативно-методическая база по проектированию вентиляции.....	51
Постановка задач исследования. Выводы	56
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЁТА СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	59
2.1. Влияние топологии сети горных выработок на проветривание	60
2.2. Прогноз и расчёт выделения вредных примесей.....	65
2.3. Расчёт необходимого для проветривания количества воздуха по определяющим факторам.....	76
2.4. Расчёт аэродинамического сопротивления	95
2.5. Определение депрессии шахт и рудников.....	107
2.6. Расчёт естественной тяги	108
2.7. Расчёт параметров управления газовыделением	121
Выводы.....	125
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ.....	127
3.1. Общие принципы	131

3.2. Аэродинамическое трение	133
3.3. Теплоперенос в рудничной атмосфере	139
3.4. Диффузия газов рудничной атмосферы	141
3.5. Уравнение движения газовой среды	146
3.6. Место математической модели в рудничной аэрологии	152
Выводы.....	155
ГЛАВА 4. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВЕНТИЛЯЦИИ ГОРНЫХ	
ПРЕДПРИЯТИЙ.....	157
4.1. Системное проектирование вентиляции шахт и рудников	157
4.2. Вентиляционная система и её взаимосвязи в общей горно- технологической системе	162
4.3. Обоснование определяющих факторов при системном проектировании вентиляции.....	165
4.4. Основные принципы системного проектирования	169
4.5. Порядок системного проектирования вентиляции горных предприятий.....	178
4.6. Информационные основы систем проектирования шахтной вентиляционной сети	180
Выводы.....	182
ГЛАВА 5. МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИИ	
ШАХТ – ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ.....	185
5.1. Методологические основы системного проектирования вентиляции горных предприятий	185
5.2. Формирование исходных данных при системном проектировании вентиляции шахт	189
5.3. Модели аэрогазотермодинамических процессов при системном проектировании вентиляции шахт.....	193
5.4. Алгоритм системного проектирования вентиляции шахт.....	205
Выводы.....	212

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ.....	214
6.1. Методика исследований.....	214
6.2. Реализация системного проектирования вентиляции шахт	215
6.3. Реализация системного проектирования вентиляции при строительстве горных предприятий.....	225
6.4. Реализация системного проектирования вентиляции на примере коммуникационных коллекторов города Москвы	238
6.5. Моделирование аварийных ситуаций в экспертных целях	243
6.6. Дополнительные возможности методологии системного проектирования вентиляционных устройств	248
6.7. Рекомендации по совершенствованию организации и нормативной базы проектирования вентиляции	250
Выводы.....	252
Заключение	254
Список сокращений и условных обозначений.....	258
Словарь терминов.....	260
Список литературы	266
Приложение 1. Перечень компьютерных программ для расчёта воздухораспределения	311
Приложение 2. Номограмма для определения падения давления на 100 м прямого участка воздуховода.....	312
Приложение 3. Дополнительные документы	313
Приложение 4. Алгоритм системного проектирования вентиляции шахт	319
Приложение 5. Перечень НИР в которых использовались результаты исследований	320

Введение

Актуальность темы исследования обусловлена повышением уровня опасности ведения горных работ в связи с интенсификацией воздействия на горный массив в процессе разработки месторождений полезных ископаемых при отсутствии нормативно-методических документов, соответствующих новым горнотехническим условиям, что приводит к возрастанию тяжести травматизма и последствий аварий, связанных с аэрологическими факторами, приобретающими характер катастроф.

В настоящее время существенно возросла не только сложность проектируемых и действующих горнодобывающих предприятий, но и величина ущерба от аварий, возникающих из-за ошибок при проектировании и эксплуатации месторождения. Для повышения уровня безопасности ведения горных работ на стадии проектирования необходимо обеспечить системное рассмотрение функционирования горного предприятия с учетом взаимодействия основных опасных факторов. При этом, в первую очередь, проектирование вентиляции – как основы жизнеобеспечения подземных горных объектов – необходимо рассматривать в виде сложной системы взаимосвязанных элементов с определенной иерархической структурой, широким набором свойств и разнообразными внутренними и внешними связями.

Объектами проектирования вентиляции в горном деле являются как подготовительные выработки (тоннели, шахтные стволы, квершлаг, штреки, очистные выработки), так и шахтные системы в целом. В отличие от большинства других производств, все указанные объекты в горном деле являются постоянно движущимися во времени и пространстве. Производственные работы проводятся в постоянно изменяющихся горно-геологических условиях и поэтому отличаются высокой динамикой.

Системное проектирование вентиляции горных предприятий направлено на то, чтобы исследовать динамику определяющих факторов

функционирования объекта во всём диапазоне их возможных изменений, включая и аварийные ситуации. Это требует расширения оценки влияния различных факторов на несколько порядков. Возможности современной техники проектирования и последующего управления аэрогазотермодинамическими процессами позволяют принимать обоснованные решения задачу эффективного и безопасного функционирования горных объектов на весь период их строительства и эксплуатации.

В связи с изложенным, проблема исследования и разработки методологии системного проектирования вентиляции горных предприятий и выработок отличается высокой актуальностью.

Цель работы – создать методологию системного проектирования вентиляции горных предприятий, учитывающую взаимодействие внутренних и внешних элементов системы проветривания, которая позволяет существенно повысить качество проектов путём использования математических моделей аэрогазотермодинамических процессов, протекающих в горных выработках.

Основная идея: методологически системное проектирование вентиляции шахт на всех стадиях развития горного объекта должно базироваться на использовании единой динамической (трансформируемой по мере развития объекта) физико-математической трёхмерной модели аэрогазотермодинамических процессов для обоснования и оптимизации технических и технологических решений по обеспечению аэрологической безопасности подземных горных работ.

Задачи исследования:

- 1) Анализ и оценка текущего состояния проветривания шахт и рудников.
- 2) Анализ и оценка существующих методов принятия решений в области проектирования вентиляции шахт и рудников, их эффективности с учётом текущего развития горнодобывающей отрасли Российской Федерации,

достоверности используемых данных при расчётах вентиляции и при аэрогазовом контроле в период эксплуатации предприятий.

- 3) Разработка методологии создания динамических моделей термо-аэрогазодинамических процессов горно-технологических систем, трансформируемых по мере развития горного предприятия в процессе его эксплуатации.
- 4) Разработка алгоритмов решения различных задач системного проектирования вентиляции шахт и рудников с учётом всех стадий существования горного предприятия на основе трехмерного моделирования термоаэрогазодинамических процессов.
- 5) Обоснование основных принципов методологии системного проектирования вентиляции горных предприятий.
- 6) Разработка порядка реализации системного проектирования вентиляции горных предприятий.
- 7) Апробация разработанной методологии системного проектирования вентиляции горных предприятий на шахтах, рудниках и объектов подземного строительства.

Методы исследования

При выполнении работы использованы общепринятые апробированные методы включающие: анализ литературных первоисточников по методикам, подходам и способам расчётов по проветриванию шахт и рудников; анализ текущего состояния проветривания горных предприятий; теория систем, кинетическая теория газов, методы математической физики; проведение натурных измерений, сбор статистических данных со стационарных систем контроля; методы численного моделирования сложных систем.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Система вентиляции горных предприятий представляет собой мультисплит-систему, проектирование которой должно осуществляться на основе разработанного алгоритма взаимосвязи внешних и внутренних факторов с учётом трансформации применяемой техники и технологий (25.00.21).
2. Проектирование систем вентиляции шахт и рудников в условиях высокой вариативности и низкой достоверности исходных данных должно базироваться на использовании трёхмерных компьютерных моделей – виртуальных аналогов подземных аэрогазодинамических систем, позволяющих в широком диапазоне изменения определяющих факторов (в том числе запредельном – аварийном, с точки зрения требований безопасности) выбрать наиболее безопасные параметры и режимы функционирования основных элементов (05.26.03).
3. Системное проектирование позволяет на базе единой математической модели, поддерживаемой в процессе развития горных работ, обеспечивать аэрологическую безопасность горного предприятия в процессе отработки месторождения за счёт постоянной трансформации моделей, краевых условий и критериев в процессе развития горных работ, проигрывания различных возможных ситуаций, в том числе аварийных (05.26.03).
4. Результаты 3D-моделирования аэрогазодинамических процессов в горных выработках и выработанном пространстве являются основой для выбора и оптимизации режимов вентиляции с учётом взаимосвязи процессов проветривания и дегазации в любых сочетаниях различных способов управления газовыделением, а также определения потенциально опасных зон (наиболее информативных) для размещения стационарных датчиков аэрогазового контроля, что позволяет существенно повысить аэрологическую безопасность при эксплуатации объекта (05.26.03).

5. Движение воздуха в горных выработках наиболее полно описывается математической моделью, основанной на кинетической теории газов, включающей законы внутреннего и внешнего трения, уравнений движения многокомпонентной газозоудшной смеси с учётом молекулярной диффузии (05.26.03).
6. Константы в уравнениях, характеризующие параметры атмосферы и свойства газов в движущемся потоке, а также аэродинамическое сопротивление, в первом приближении (на стадии проектирования) принимаются по справочным данным, на следующих этапах, по мере развития горных работ, корректируются на основании наблюдений. Порядок проектирования вентиляции горных предприятий должен предусматривать обязательную систематическую верификацию используемых моделей с шахтными измерениями (25.00.21).
7. Применение системного проектирования вентиляции горных предприятий позволяет на качественно более высоком уровне обеспечить государственную экспертизу проектов вентиляции шахт и рудников, а также расследование причин аварий, инцидентов и оптимизировать процесс ликвидации их последствий. Разработанный порядок реализации систем позволяет повысить качество применяемых решений и эффективность функционирования объекта проектирования за счёт адаптации параметров системы вентиляции к динамично меняющимся горно-геологическим и технологическим условиям (25.00.21 и 05.26.03).

Научная новизна исследования: главное отличие предложенной методологии от используемых в настоящее время методик и программ, позволяющих решать отдельные задачи рудничной аэрогазодинамики и шахтной вентиляции, заключается в системном рассмотрении указанных процессов, их взаимодействии для обеспечения научного сопровождения развития системы вентиляции на протяжении всего срока функционирования горного предприятия; впервые задачи проектирования решаются на основе

единой аналитической математической трёхмерной модели процессов термоаэрогазодинамики, исследуемых в рамках целостной системы, что позволяет рассчитывать и визуализировать протекание процессов в широком диапазоне основных влияющих факторов (параметров), изменяющихся во времени и пространстве, а также оптимизировать управление этими процессами.

Теоретические значения исследований заключаются: в развитии методов проектирования вентиляции подземных горных предприятий с использованием современных информационных технологий, позволяющих реализовать системный подход на стадиях их проектирования и эксплуатации в оперативном режиме; в обосновании принципов системного проектирования; в разработке моделей, учитывающей взаимодействие внешних и внутренних факторов; в создании методологии системного проектирования вентиляции горных объектов, включающей методическое и алгоритмическое обеспечение на основе предложенных принципов, методов, порядка реализации и единой модели.

Практическая ценность работы заключается: в создании инструментария, позволяющего существенно повысить качество проектов систем вентиляции горных предприятий и управления термоаэрогазодинамическими процессами в горных выработках; в разработке предложений по созданию единой базы исходных данных для проектирования и управления аэрологической безопасностью, в том числе с возможностью оптимизировать управление этими процессами при реальном функционировании горной системы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается

- 1) соответствием методологии системного проектирования вентиляции шахт принципам теории сложных систем;

- 2) применением апробированного математического аппарата для описания процессов рудничной термоаэрогазодинамики;
- 3) применением общепризнанных численных методов решения классических дифференциальных уравнений;
- 4) положительной верификацией и согласованием полученных результатов расчётов с натурными измерениями, проведёнными на горных предприятиях и на объектах подземного строительства (расхождение не более 10%);
- 5) большим объёмом экспериментальных исследований в шахтных условиях (от 1000 до 32 000 измерений за один цикл, измерения проводились переносными приборами с возможностью записи параметров через каждые 0,001 с);
- 6) адекватностью используемых виртуальных аналогов подземной термоаэрогазодинамической системы и метода численного моделирования реальным условиям функционирования системы.

Апробация работа

Научные положения и основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2008-2016 гг.), в Международной научной школе академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, РАН ИПКОН РАН, 2012, 2014, 2015 гг.), на XII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, МГРИ-РГГРУ, 2015, 2016 гг.), на международной конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2015 г.), в Международной научной школе молодых учёных и специалистов (Москва, РАН ИПКОН РАН, 2009 г.), на международной молодежной научной школе «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, РАН ИПКОН РАН, 2012, 2014, 2015 гг.), на IV International research and practice conference, (Германия, Munich,

2013 г.), на Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий» (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2014 г.), на Международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Санкт-Петербург, НМСУ «Горный», 2014 г.), VIII Международной горноспасательной Конференции IMRB-2017 (Москва-Новокузнецк-Санкт-Петербург, 2017 г.).

Реализация и внедрение

Результаты исследований использованы при пересмотре проектных решений по системе вентиляции строящихся стволов ВС-10 и СКС-1 шахты «Скалистая» рудника «Комсомольский» Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский Никель» с учётом экспериментально измеренных термоаэрогазодинамических параметров «Тиссен Шахтбау ГмбХ» (Германия) 2014-2017 гг.; при проектировании параметров проветривания горных выработок рудника «Таймырский» Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский Никель» при их проходке; при разработке нормативного документа по проектированию вентиляции подземных коммуникационных коллекторов ФГУ «Москоллектор» при их эксплуатации, а также для обоснования параметров реконструкции систем вентиляции коммуникационных коллекторов «Гостиный двор», «Академический», «Первомайский» 2015-2017 гг.; в учебном процессе – в программе дисциплины «Аэрология горных предприятий» по направлению подготовки «Горное дело» 2017 г.

Связь работы с научными программами и темами

Диссертационная работа выполнена в период с 2011 года по 2018 год на кафедре «Безопасность и экология горного производства», Горного института НИТУ «МИСиС» (ранее кафедра «Аэрология и охрана труда», МГГУ) в рамках

выполнения индивидуального плана, государственных контрактов Министерства энергетики Российской Федерации (№ 17/0411.3070390019.241/11/161, Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 2014/113 проект № 36, №14.В37.21.0655, АОТ-908ДС), а также с тематикой хоздоговорных работ с предприятиями АО «СУЭК», ООО ««Тиссен Шахтбау ГмбХ» (Германия)» и ГУП «Москоллектор».

Личный вклад автора

Автором проведены: анализ научной, методической и нормативной документации; численные расчёты и эксперименты по разработанным методикам; натурные исследования на шахтах, рудниках, строящихся горных предприятиях и в городских подземных сооружениях. Выдвинута гипотеза описания процессов проветривания на основе кинетической теории газов. Разработаны методологические основы системного проектирования, алгоритм, единая модель, порядок проектирования и рекомендации по реализации. Внедрение результатов исследований в форме решения частных задач для конкретных объектов.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 55 печатных работ, в том числе 1 монография, 1 авторское свидетельство, 4 учебно-методических пособия, 6 в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, 19 статей в изданиях, входящих в перечень рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ и 24 индексируемых в базе данных РИНЦ.

Объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения. Работа изложена на 322 страницах машинописного текста, содержит 103 рисунка и 25 таблиц. Список использованных источников состоит из 366 наименований, в том числе 80 зарубежных.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту д.т.н. профессору Н.О. Калединой за неоценимую помощь при работе над диссертацией; члену-корреспонденту РАН Л.А. Пучкову – за ценные советы и замечания; за содействие в организации и проведении натурных исследований, экспериментов и внедрении – старшему научному сотруднику ИПКОН РАН А.С. Кобылкину; специалисту ГУП «Москоллектор» А.Ю. Калядину; специалистам компании «Тиссен Шахтбау ГмбХ»: О.С. Каледину, А.В. Неффу, В.А. Боргенсу, А.М. Широкову, В.А. Стричко, А.В. Степанову, С.А. Дядину, В.Г. Воропаеву, А.В. Леонову, И.В. Трифонову, В.В. Гореликову, А.В. Клименко и др. За предоставленную информацию по состоянию проветривания горных предприятий России автор выражает глубокую признательность ФГУП ВГСЧ и Ростехнадзору. Отдельная благодарность выражается сотрудникам кафедры «Безопасность и экология горного производства» Московского горного института.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ И РУДНИКОВ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

На 1 января 2017 года в Российской Федерации зарегистрированы в Ростехнадзоре РФ, как опасные производственные объекты: 101 угольная шахта (на 60 ведутся работы по добыче угля; 41 – в стадии консервации, ликвидации, строительства, приостановлены на неопределенный срок), 258 угольных разрезов (на 227 ведутся горные работы; 41 – в стадии консервации, ликвидации, приостановлены на неопределенный срок), 172 рудника и 1301 карьер. По специфике ведения горных работ и горно-геологических условий горнодобывающие предприятия при проведении анализа состояния проветривания разделяются на четыре группы: 1 – угольные шахты; 2 – рудники; 3 – объекты подземного строительства; 4 – карьеры и разрезы. Первая группа, как правило, характеризуется горно-геологическими условиями разрабатываемого полезного ископаемого, значительной протяженностью горных выработок, повышенной метановой опасностью, спецификой применяемого оборудования (комбайновая выемка), системой разработки, длинными очистными забоями. Вторая группа характеризуется горно-геологическими условиями, применяемым оборудованием (буровзрывной способ выемки), системой разработки – камерная или камерно-столбовая система разработки, для которой характерна значительная вариативность горно-технологических условий. Третья группа характеризуется особенностями проветривания тупиковых горных выработок большого сечения, специфическими условиями ведения горных работ (в том числе, в условиях городских застроек, коммуникаций и т.п.). Четвертая группа рассматривается отдельно ввиду значительных отличий факторов, влияющих на процесс проветривания. В данной работе объектами исследований являются первые три группы.

Для каждой группы объектов исследования должны быть разработаны единые методологические подходы проектирования вентиляции.

Уровень проектирования вентиляции, проектная и нормативно-правовая база для всех групп различны. Для угольных шахт существует большое количество документов разного административного уровня, регламентирующих как проектирование вентиляции, так и аэрогазовый контроль, большое количество научных исследований по аспектам проветривания. Для рудников на сегодняшний момент сложилась ситуация с отсутствием какого-либо внятного руководства, инструкции или чего-то подобного для проектирования вентиляции. Все расчёты ведутся на местах специалистами, полагающимися на свой опыт, используя при этом подручную литературу или аналогичные проекты с других предприятий. Для сложных условий на рудниках предлагается использовать Руководство для проектирования вентиляции шахт [207]. Тенденция объединения шахт в одну при дальнейшем развитии горных работ с целью усовершенствования транспортировки добытого полезного ископаемого ещё более усложняет задачу проветривания в рамках единой системы.

Применение компьютерных программ для расчёта вентиляции («АэроСеть», «Вентиляция», «ВентПЛА», «РЕВОД» – программы для расчёта естественного воздухораспределения и обработки депрессионной съемки и т.п.) привело к тому, что при проектировании и на предприятиях перестали составлять аэродинамические схемы, большое число горных выработок усложняют проветривание, делают его менее надежным и неустойчивым. У инженерно-технических работников произошла подмена понятий аэродинамической схемы и схемы вентиляции, объединенной с планом ликвидации аварий. Однако применение компьютерных программ привело к уменьшению трудоёмкости и времени, затрачиваемого на проведение расчётов. С другой стороны, наблюдается появление новых проблем, связанных с достоверностью аэродинамических характеристик выработок, анализом динамики газового баланса, качества шахтной вентиляционной сети и эффективности проветривания.

Практика последних лет (с 2000 годов по настоящее время) показывает, что при быстром сокращении числа научно-исследовательских институтов в области горного дела и, в частности, отделов и лабораторий, занимающихся вопросами вентиляции, нормативные документы, регламентирующие порядок проектирования и контроля параметров вентиляции, разрабатываются на местах горнодобывающими организациями, добывающими полезные ископаемые. Крупные российские компании, например, АО «СУЭК», ПАО «ГМК «Норильский Никель», ЕВРАЗ, ПАО «Мечел», ПАО «Северсталь», ПАО «ФосАгро» и другие разрабатывают свои внутренние документы, такие как технические регламенты, инструкции, распоряжения и приказы по вентиляции. При этом в основе используют существующие документы, добавляя характеристики вновь внедряемых технических средств, вентиляционных устройств и приборов.

Часть факторов, влияющих на рудничный воздух и параметры его движения, на сегодняшний момент описываются дифференциальными уравнениями, другая часть – эмпирическими формулами, полученными путём проведения многочисленных экспериментов как в лабораторных, так и в натурных условиях. Эти уравнения не связаны друг с другом и решаются самостоятельно, как отдельные задачи проектирования.

Вызывают вопрос расчёты необходимого количества воздуха, подаваемого в шахту или рудник, а также расчёты по прогнозу газовыделения от различных источников. Актуален вопрос по газораспределению в горных выработках и в выработанном пространстве. Анализ этих зависимостей приведён во втором разделе данной работы.

В современных условиях проектирование вентиляции как вновь строящихся, так и действующих горнодобывающих предприятий должно проводиться в рамках единой системы математических уравнений, описывающих все факторы, влияющие на рудничный воздух во время его движения по горным выработкам, отработанным участкам, выработанному

пространству. При этом составлению системы уравнений требуется уделить особое внимание.

1.1. Анализ текущего состояния и развития горнодобывающих предприятий Российской Федерации

Объектом диссертационного исследования являются подземные горнодобывающие предприятия. Целью раздела является определение текущего состояния горнодобывающей отрасли Российской Федерации, а также краткосрочный прогноз путей развития данной отрасли.

Понимание тенденций развития позволит правильно сформулировать цель и идею данной работы.

Запасы угля в Российской Федерации составляют 273,4 млрд т, ресурсный потенциал в 5,5 раз больше и составляет 1516 млрд т по данным на 2012 г. Следует отметить и большую разницу в значениях прогнозных ресурсов по сравнению с 2011 годом (таблица 1.1). По разведанным запасам угля Российская Федерация находится на втором месте после Соединенных Штатов Америки, по добыче – находится на пятом месте, несмотря на то, что количество добываемого угля в стране растет (рисунок 1.1). В десятку лидеров по добыче угля входят ЮАР, Индонезия, Казахстан и Польша. К данным странам будет обращено особое внимание при анализе применяемых способов проектирования вентиляции, методик и технических решений по проветриванию.

Из государственного доклада [38] на 2011 г. следует, что основное количество запасов Российской Федерации (разведанных ресурсов P_1) более 10 млрд т сосредоточено в Кузнецком, Канско-Ачинском, Ленском, Печорском бассейнах, менее 10 млрд т. находится в Донецком, Тунгусском, Иркутском, Сосьвинско-Салехардском, Южно-Якутском, Буреинском, Минусинском, Улугхемском бассейнах и менее 1 млрд т – в Подмосковном, Зырянском, Таймырском, Челябинском, Горловском, Раздольненском и

Партизанском бассейнах (рисунок 1.2). Следует также отметить, что по отчёту той же организации, но на 2012 год, часть угольных бассейнов (Подмосковный, Буреинский, Сосьвинско-Салехардском, Челябинский, Таймырский) вовсе отсутствует.

Таблица 1.1 – Состояние минерально-сырьевой базы углей Российской Федерации на 01.01.2011/01.01.2012 г., млрд т [37]

Прогнозные ресурсы	P ₁	P ₂	P ₃
количество	539,3/461,8	734,8/382,1	2553,8/672,1
Запасы	разведанные (A+B+C ₁)	предварительно оцененные (C ₂)	
количество	193,7	79,5	
изменение по отношению к запасам на 01.01.2011 г.	-0,03	0,1	
доля распределенного фонда, %	17,4	4	

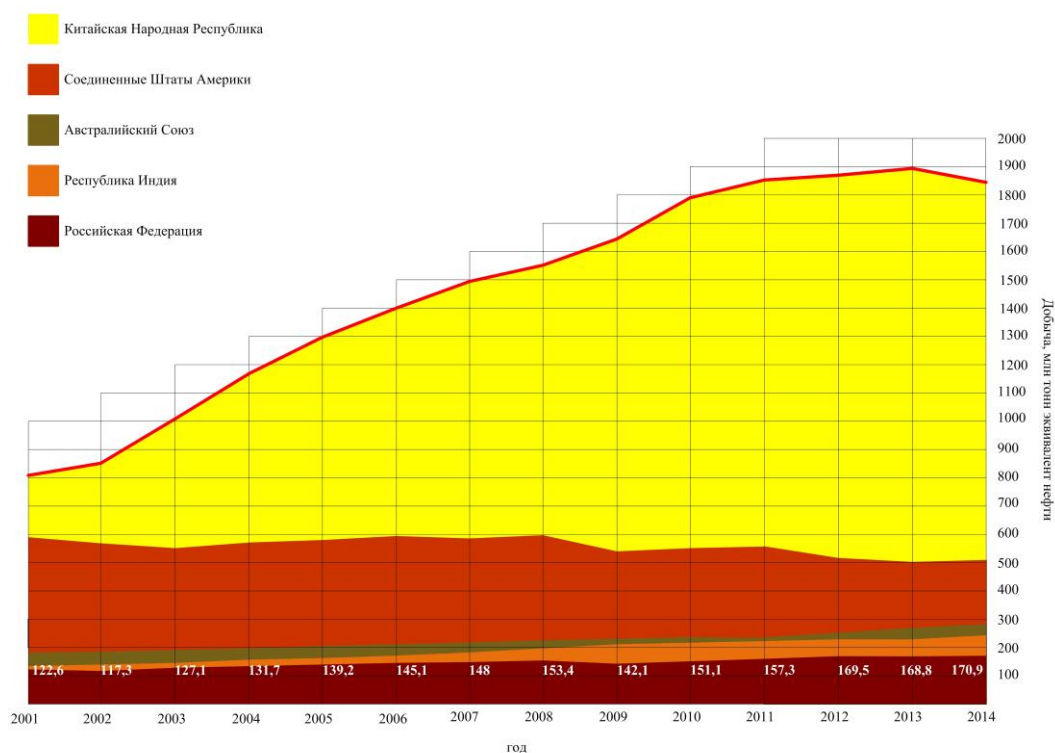


Рисунок 1.1 – Объем добычи угля по пяти ведущим странам мира [283]

На сегодняшний момент прирост разведанных запасов в России приблизительно равен объёму добычи. При этом большая часть вновь разведанных запасов приходится на неосвоенные области и территории, удалённые от коммуникаций.

Вторым важным моментом является то, что для новых угольных месторождений (бассейнов) нет справочных данных по коэффициентам в Руководстве [207]. Эти обстоятельства ставят проектировщиков в сложное положение.

С учётом сегодняшних темпов добычи (рисунок 1.2) и спросом на уголь (рисунок 1.3) запасов хватит более чем на 885 лет, без учета прироста за счёт вновь разведанных запасов. При этом возрастёт стоимость угля за счёт его транспортировки и усложняющихся горно-геологических условий, влияющих на добычу. Возможно, будут приняты в разработку новые месторождения в Якутии и на Дальнем Востоке.



Рисунок 1.2 – Динамика добычи угля разных типов в 2002-2011 гг. (по маркшейдерским замерам), млн т [37]

В Российской Федерации на сегодняшний день добыча угля осуществляется на 97 шахтах. Территориально их расположение (рисунок 1.4) свидетельствует о том, что наиболее интенсивно добычу осуществляет Кузнецкий угольный бассейн. Это связано с наличием большого количества разведанных запасов, качеством добываемого угля и полной высокоразвитой

инфраструктурой. При этом следует отметить падение рентабельности ведения горных работ в этом регионе из-за удаленности горнодобывающих предприятий от основных потребителей и стран-экспортеров. Транспортные расходы значительно влияют на развитие региона и на потребности в угле.

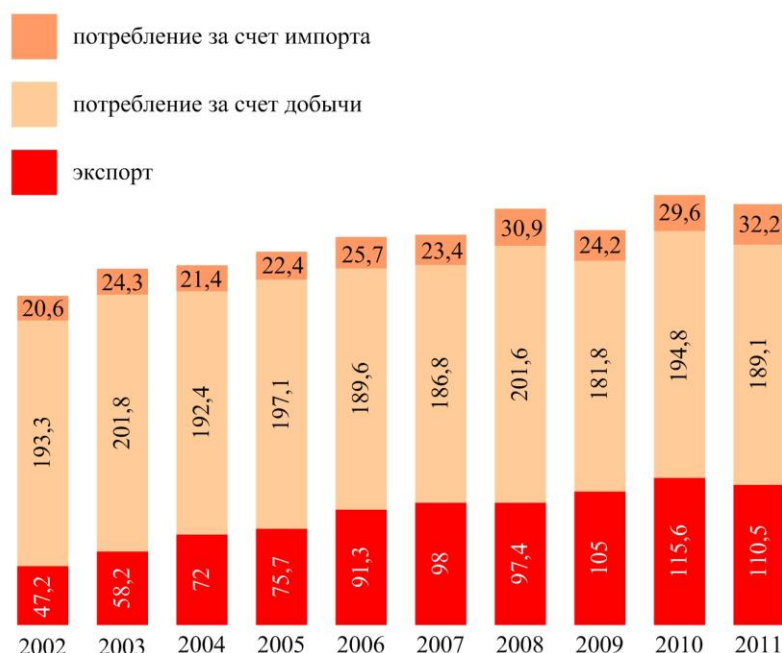


Рисунок 1.3 – Динамика экспорта угля из Российской Федерации и его потребление в 2002-2011 гг., млн т [37]

На сегодняшний день половина шахт и разрезов принадлежат десятку частных компаний. Из их общего распределения (рисунок 1.5 и 1.6) видно, что половина угледобывающих предприятий находится в собственности крупных металлургических компаний, также имеющих рудники, карьеры, обогатительные фабрики и металлургические заводы.

Следовательно, руководству компаний приходится решать системные вопросы проветривания как шахт, так и рудников. Карьеры и разрезы редко имеют расчёты по проветриванию. Это связано с ошибочным мнением о том, что естественное проветривание обеспечивает соответствие требованиям Правил и нормы [164].

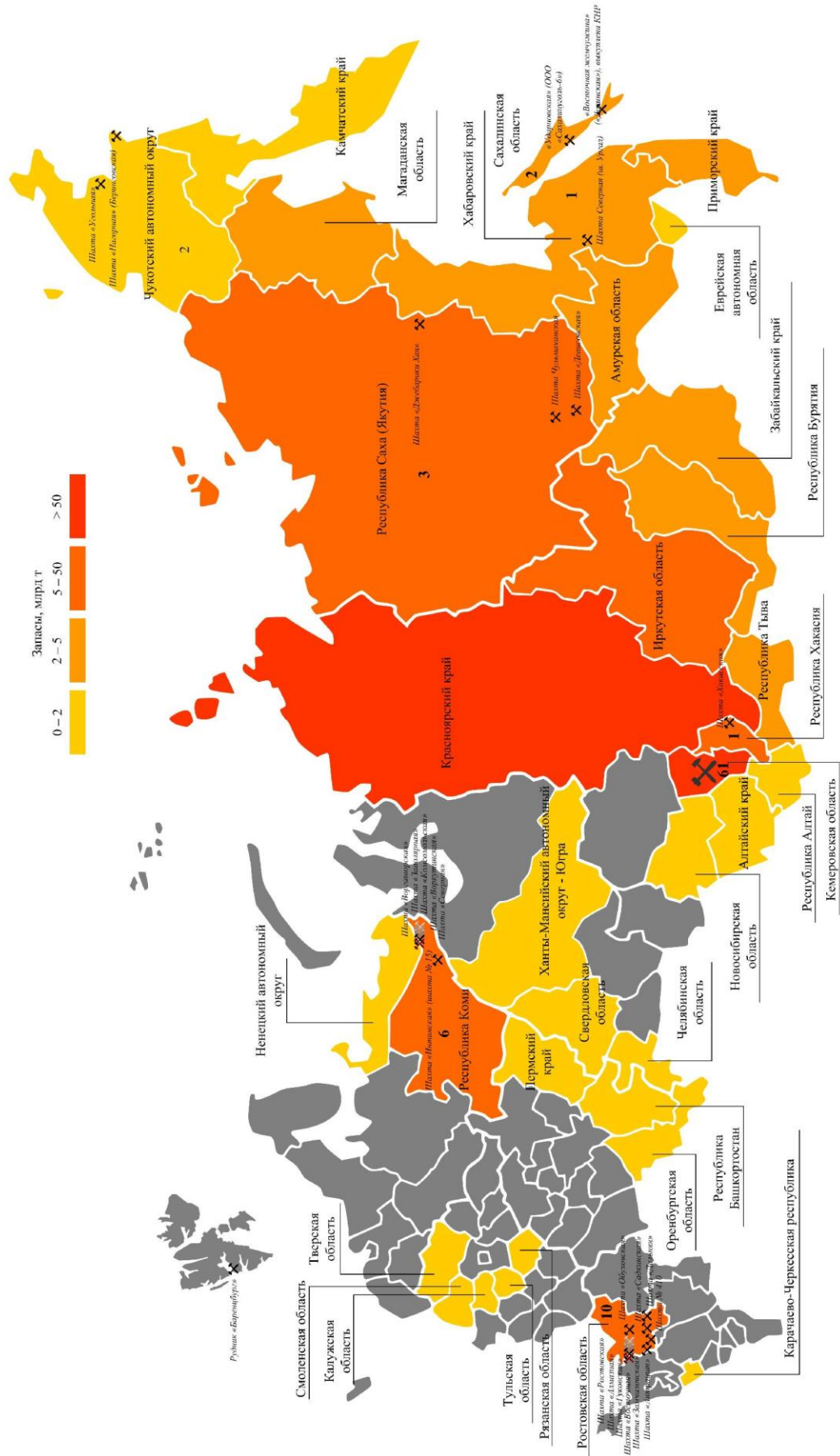


Рисунок 1.4 – Запасы угля и месторасположение шахт в Российской Федерации на 2013 г.

СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ КОМПАНИЙ	КОМПАНИИ - ВЛАДЕЛЬЦЫ	КОМПАНИИ - ОПЕРАТОРЫ	УГОЛЬНЫЕ БАССЕЙНЫ, МЕСТОРОЖДЕНИЯ	ШАХТЫ
УГЛЕДОБЫВАЮЩИЕ	ОАО «СУЭК» [171]	ОАО «СУЭК-Кузбасс»	Кузнецкий бассейн	Шахта им. С.М. Кирова
				Шахта им. А.Д. Рубана (шахта «Красноярская»)
				Шахта им. 7 ноября
				Шахта «Талдинская-Западная - 1»
				Шахта «Талдинская-Западная - 2»
				Шахта «Котинская»
				Шахта №7
				Шахта «Польсасовская»
		ООО «СУЭК-Хакасия»	Минусинский бассейн	Шахта «Хакасская»
		ОАО «Ургалуголь»	Буренский бассейн	Шахта «Северная» (с 2004 г. объединения с шахтой «Ургал»)
	ОАО «Приморскуголь»	Раздольненский бассейн	ШУ «Восточное»	
	ОАО ХК «СДС-УГОЛЬ»	Шахта «Листвяжная»	Кузнецкий бассейн	Шахта «Листвяжная»
		ЗАО «Салек»		ЗАО «Шахта «Салек»
		ОАО «Шахта «Южная»		Шахта «Южная»
		ОАО «Прокопьевскуголь»		Шахта «Красногорская»
	ООО «Кингкоул»	ООО «Кингкоул»	Донецкий бассейн	Шахта им. Ворошилова
				Шахта «Зиминка»
				Шахта «Алмазная» (бывшая шахта № 25 «Туковская»)
				Шахта «Туковская»
	ООО Угольная компания «Заречная»	шахтоучасток «Октябрьский» ООО «ШУ «Карагайлинское» ОАО «Шахта «Заречная» ОАО «Шахта «Алексиевская» ОАО "Шахтоуправление "Анжерское" Шахта «Сибирская»	Кузнецкий бассейн	Шахта «Алмазная»
				Шахта «Ростовская» (до 1971 года — шахта № 19-20)
				Шахта «Замчаловская»
				Шахтоучасток «Октябрьский»
				ООО «Шахтоуправление «Карагайлинское»
				ОАО «Шахта «Заречная»
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ	ОАО «МЕЧЕЛ»	ОАО ХК «Якутуголь»	Южно-Якутский бассейн	Шахта «Джебарикси-Хая»
		ОАО «Южный Кузбасс»	Кузнецкий бассейн	Шахта «Ольжарасская-Новая»
	ЕВРАЗ ГРУПП С.А.	ОАО ОУК «Южубассеуголь»		Шахта им. В. И. Ленина
				Шахта «Сибиргинская»
				Шахта «Абаневская»
				Шахта «Алардинская»
				Шахта «Есаульская»
		Шахта «Осинниковская»		
		Шахта «Томусинская 5-6»		
		Шахта «Усковская» (до 2007 г. Шахта «Ульяновская», с 2009 по 2012 гг. Шахта «Юбилейная 2 район»)		
		Шахта «Кушековская»		
		Шахта «Ерунаковская УИ»		
	ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ» [170]	ОАО «Воркутауголь»	Печорский бассейн	Шахта ОАО «Распадская»
				Шахта ОАО «МУК-96»
				Шахта ЗАО «Распадская Коксовая» (располагается на шахтном поле Шахты «Томусинская 5-6» (шахта имени Шевырева))
				Шахта «Северная»
				Шахта «Комсомольская»
	ООО УК «Промышленно-металлургический холдинг» [173]	ООО «Кокс-майнинг»	Кузнецкий бассейн	Шахта «Заполярная»
				Шахта «Воркутинская»
		ОАО «Кокс»		Шахта «Воргашорская»
				ЗАО «Сибирские ресурсы» (шахта «Владимирская-1»)
				ООО «Горняк» (шахта «Романовская-1»)
	ООО «Шахта «Бутовская»			
	Шахта имени С.Д. Тихова			

Рисунок 1.5 – Основные угледобывающие компании и угольные шахты на территории России (2012 г.)

СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ КОМПАНИЙ	КОМПАНИИ - ВЛАДЕЛЬЦЫ	КОМПАНИИ - ОПЕРАТОРЫ	УГОЛЬНЫЕ БАССЕЙНЫ, МЕСТОРОЖДЕНИЯ	ШАХТЫ	№	
УГЛЕДОБЫВАЮЩИЕ	Арктикуголь	ФГУП ГТ «Арктикуголь»	Пласт «Верхний», архипелаг Шпицберге	Рудник «Баренбург»	1	
	ОАО Шахта «Интауголь»		Донецкий бассейн	Шахта «Интинская» (шахта № 15)	2	
	ООО «Мечел майнинг»	ООО «Мечел майнинг»		Шахта «Восточная» (бывшая шахта имени 50-летия Октября)	3	
	ООО «Шахта «Антрацит»			Шахта «Антрацит» (бывшая «Октябрьская-Южная» и имени М. Чуха)	4	
	ООО «Южная угольная компания»			Шахта «Садковская»	5	
	ДТЭК (Украина)			Шахта «Обуховская»	6	
				Шахта «Дальняя» (до 1971 года — шахта № 17)	7	
				Шахта № 410	8	
	ООО «Сахалинуголь-б»			Мгачинское, Лесогорское, Углегорское, Лопатинское месторождение	Шахта «Ударновская»	9
	«Восточная жемчужина» («Долинская»), выкуплена представителями КНДР			Шахта «Восточная жемчужина» («Долинская»)	10	
	ООО «Мечел майнинг»	ХК «Якутуголь»	Нерюнгринское месторождение	Шахта «Джебарики Хая»	11	
	Группа компаний «Колмар»	ОАО УК «Нерюнгриуголь»		Шахта «Денисовская» и участок подземной отработки пластов Д19, Д15, Д11в, Д11н	12	
		ЗАО "Якутские угли - новые технологии"		Шахта «Ингалтинская-1,2» (закрываема)	13	
		ОАО "Шахта «Дежневская»		Шахта «Дежневская»	14	
	ГУП ЧАО «Чукотснаб»				Шахта «Нагорная» («Беринговская»)	15
	ООО «Эрчим-Тхай»		Чулымканское месторождение	Шахта «Чулымканская»	16	
	ООО «УК «Заречная»	ОАО «Шахта Заречная»	Кузнецкий бассейн	ОАО «Шахта «Заречная»	17	
		ОАО «Шахта Алексеевская»		ОАО «Шахта «Алексеевская»	18	
	ООО "УгольПроектСервис"	ООО Шахта «Зенковская»		Шахта «Зенковская»	19	
		Шахта «Коксовая-2»		Шахта «Коксовая-2»	20	
		Шахта «Им. Дзержинского»		Шахта «Им. Дзержинского» (№ 9 им. Кагановича)	21	
	ЗАО «ТопПром»			Шахта «Юбилейная»	22	
	«Лехрам» Англия, Игорь Рудык			Шахта «Тагарынская»	23	
				Шахта «Грамотеинская»	24	
	ОАО УК «Кузбассразрезуголь»			Шахта «Байкайская»	25	
	ООО «Западно-Сибирская угольная компания» (ЗСУК)			Шахта «Полосухинская»	26	
				Шахта «Кыргайская»	27	
				Шахта «Талдинская-Южная»	28	
				Шахта «Берёзовская»	29	
	ArcelorMittal "Миттал Стeel Холдингз АГ"	ОАО "Угольная компания "Северный Кузбасс"			Шахта «Первомайская»	30
	ООО УК «Промуглесбыт»				ООО «Шахта Колмогоровская -2»	31
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ	ОАО «ХОЛДИНГ СИБУГЛЕМЕТ»	ЗАО «Шахта «Антоновская»		Шахта «Антоновская»	32	
		ОАО «Шахта «Большевик»		Шахта «Большевик»	33	
	ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»	ОАО «Белон»		Шахта «Чертинская-Коксовая»	34	
		ОАО «Белон»		Шахта «Чертинская-Южная»	35	
		ОАО «Белон»		Шахта «Костромовская»	36	

Рисунок 1.6 – Основные угледобывающие компании и угольные шахты на территории России (2012 г.) - продолжение

Возвращаясь к основному вопросу данной работы – системному проектированию вентиляции шахт и рудников, на основании проведенного анализа ресурсной базы Российской Федерации по запасам угля, в работе необходимо рассмотреть все регионы и области страны, где в настоящее время и в будущем возможна добыча угля. Также необходимо проанализировать все

параметры во всех регионах и областях страны, влияющие на проветривание угольных шахт, так как 34 региона страны являются потенциальными местами ведения горных работ, связанных с добычей угля.

1.2. Анализ состояния вентиляции шахт Российской Федерации

Количество угольных шахт в Российской Федерации с 2009 по 2017 г., по данным Ростехнадзора, уменьшилось незначительно со 114 до 101. При этом на Урале (Челябинская, Свердловская и Оренбургская области) последние угольные шахты были закрыты в период с 2008-2013 гг. (шахта «Коркинская» закрыта в 2013 году, шахта «Комсомольская» – в 2008 г., шахта «Центральная» – в 2005 г.), в 2010 г. закрылась последняя в Подмосковном угольном бассейне шахта «Подмосковная», в 2017 г. на острове Сахалин объявлена банкротом последняя шахта «Ударновская» (ООО «Сахалинуголь-6»). Анализ развития проветривания угольных шахт [63] выполнен на основе информации целевых проверок состояния вентиляционных систем, проводимых горноспасательными службами.

За восемь лет количество негазовых шахт, первой и второй категории уменьшилось почти в два раза (таблица 1.2), при этом сверхкатегорных и опасных шахт по внезапным выбросам угля и газа уменьшилось незначительно.

Количество метанообильных шахт в основном угледобывающем регионе страны (Кузнецком угольном бассейне) остаётся постоянным, при этом количество шахт первой и второй категории уменьшилось более чем в два раза.

Анализ резерва проветривания шахт и их оснащённости главными и вспомогательными вентиляторами на 2009 год (таблица 1.3) показывает, что пятая часть применяемых установок (21,5%) работают на предельных углах разворота лопаток, 51 установка не имеет резерва по депрессии, 41 – по производительности, т.е. отсутствуют возможности обеспечения подачи дополнительного количества воздуха в шахты. Следует отметить, что на некоторых установках вентиляторов главного проветривания отсутствуют

самописцы депрессии и расхода воздуха. Встречаются случаи отсутствия резервных вентиляционных установок главного проветривания.

Таблица 1.2 – Распределение шахт по категориям метанообильности в 2009 г. и 2017 г.

ОВГСО	Количество обслуживаемых шахт		Негазовые		I категории		II категории		III категории		Сверхкатегорийные		Опасные по внезапным выбросам угля и газа	
Кемеровский	33	22	0	0	7	3	10	3	4	6	8	5	4	5
Прокопьевский	18	9	0	0	3	3	5	0	2	1	3	3	5	2
Новокузнецкий	25	23	0	0	0	1	3	0	6	2	10	13	6	7
Восточной Сибири	3	2	1	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Ростовской области	15	6	13	6	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ОБР ВГСЧ	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Урала	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Печорского бассейна	7	5	0	0	0	0	0	1	1	0	2	1	4	2
Сахалина	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Дальнего Востока	6	4	0	1	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0
ИТОГО:	114	71	18	7	19	11	19	5	14	9	24	22	20	16
ГОД	2009	2017	2009	2017	2009	2017	2009	2017	2009	2017	2009	2017	2009	2017

Приведённые данные по способу проветривания угольных шахт (таблица 1.4) характеризуют состояние проветривания шахт, обслуживаемых подразделениями ВГСЧ. Применение комбинированного способа проветривания (нагнетательно-всасывающего) и всасывающего сократилось на треть. На угольных шахтах преобладающим остаётся нагнетательный способ проветривания, несмотря на то что было решение перевести все угольные шахты на всасывающий способ проветривания.

Таблица 1.3 – Данные по резерву проветривания на 2009 г.

Подразделения ФГУП ВГСЧ	ВУ с углами 40-45 град.		Отсутствие резерва проветривания				Отсутствие самописцев				Отсутствие резервных агрегатов	
			по депрессии		по воздуху		депрессии		воздуха			
	количество ВУ	процент	количество ВУ	процент	количество ВУ	процент	количество	процент	количество	процент	количество	в т. ч. на газовых шахтах
КОВГСО	7	15,2	24	52,2	10	21,7	7	15,2	7	15,2	0	0
ПОВГСО	3	17,0	14	82,0	6	20,0	6	20,0	6	20,0	0	0
НОВГСО	4	10,0	3	7,0	11	27,5	10	25,0	16	40,0	0	0
ОВГСО Печорского бассейна	5	41,7	2	14,0	4	33,3	0	0	0	0	0	0
ОВГСО Ростовской области	5	17,0	5	17,0	5	17,0	5	17,0	5	17,0	5	0
ОВГСО Восточной Сибири	0	0	0	0	0	0	5	100	5	100	0	0
ОВГСО ДВ	1	16,6	1	33,0	1	33,3	4	66,0	4	66,0	1	1
ОВГСО Урала	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сахалинский ОВГСО	0	0	0	0	0	0	1	50,0	1	50,0	0	0
ОБР ВГСЧ	2	33,0	2	33,0	4	66,0	5	83,0	2	33,0	5	0
ФГУП ВГСЧ	27	21,5	51	34,0	41	31,2	43	47,0	46	42,7	11	1

Таблица 1.4 – Состояние проветриваемых шахт за 2009 г. и 2017 г.

ОВГСО	Способ проветривания		
	нагнетательный 2009/2017	всасывающий 2009/2017	комбинированный 2009/2017
Кемеровский	24/19	1/1	5/2
Прокопьевский	12/8	2/0	4/1
Новокузнецкий	17/17	2/1	2/1
Восточной Сибири	1/2	1/0	1/0
Ростовской области	3/1	12/5	0/0
ОБР ВГСЧ	1/0	3/0	0/0
Урала	0/0	1/0	0/0
Печорского бассейна	0/0	7/4	0/0
Сахалина	2/0	0/0	0/0
Дальнего Востока	6/4	0/0	0/0
ИТОГО:	66/51	29/11	12/4

Сравнительные данные, характеризующие распределение шахт по схемам проветривания (таблица 1.5), показывают, что количество фланговых схем проветривания сократилось в два раза. Из приведенных ниже данных следует, что наиболее распространенной схемой проветривания шахт является комбинированная (45 шахт или 39,5% в 2009 г. и 31 шахта 47,8% в 2017 г.).

Таблица 1.5 – Состояние минерально-сырьевой базы углей за 2009 г. и 2017 г.

ОВГСО	Схемы проветривания		
	фланговая 2009/2017	центральная 2009/2017	комбинированная 2009/2017
Кемеровский	16/13	4/3	8/6
Прокопьевский	9/1	1/3	8/6
Новокузнецкий	2/1	2/4	16/12
Восточной Сибири	3/1	0/0	0/1
Ростовской области	4/2	5/2	6/2
ОБР ВГСЧ	1/0	2/0	1/0
Урала	0/0	0/0	1/0
Печорского бассейна	3/1	0/0	4/3
Сахалина	1/0	1/0	0/0
Дальнего Востока	5/3	0/0	1/1
ИТОГО:	44/22	15/12	45/31

Сведения по шахтам и очистным забоям, на которых применяются газоотсасывающие установки (ГОУ) за 2009 г. и 2017 г., представлены в таблице 1.6. Из представленных сведений следует, что только в Кузбассе применяют газоотсасывающие установки, при этом их количество за восемь лет уменьшилось в 2,5 раза.

Таблица 1.6 – Применение ГОУ по данным за 2009 г. и 2017 г. (частично)

ОВГСО	Количество шахт, на которых применяются ГОУ (данные за 2009 г.)	Количество очистных забоев с ГОУ(2009 г./2017 г.)
Кемеровский	11	14/7
Прокопьевский	0	0/3
Новокузнецкий	10	19/3
Восточной Сибири	0	0/0
Ростовской области	0	0/0
ОБР ВГСЧ	0	0/0
Урала	0	0/0
Печорского бассейна	0	0/0
Сахалина	0	0/0
Дальнего Востока	0	0/0
ИТОГО:	21	33/13

Сведения, характеризующие состояние проветривания и дегазации очистных забоев на обслуживаемых шахтах, представлены в таблице 1.7. Из приведенных ниже данных следует, что приоритетной схемой проветривания очистных забоев является возвратноточная схема (117 забоев или 86,7% от общего их числа). Следует отметить, что только в 38 забоях (33,3% от общего их количества) применяется дегазация угольных пластов и спутников, что свидетельствует о крайне низком уровне ее использования.

Анализ выполнения требований п.244, 261 и 272 ПБ в угольных шахтах в части обеспечения обособленного проветривания подготовительных забоев на обслуживаемых ОВГСО шахтах, представлен в таблице 1.8, из которой следует, что из-за нерационального распределения воздуха для проветривания горных работ и его дефицита на 24-х шахтах имеет место последовательное проветривание 40 (или 10%) подготовительных забоев.

В ОАО «Воркутауголь» на шахтах «Воркутинская», «Заполярная», «Комсомольская» и «Северная блок № 1» имеется 11 очистных и подготовительных забоев с необособленным проветриванием, на которые местными органами горного надзора выданы специальные разрешения на последовательное их проветривание.

Таблица 1.7 – Сведения по применению дегазации

ОВГСО	Всего очистных забоев, единиц	Количество шахт, на которых применяются ГОУ	В том числе с дегазацией	Тип схемы проветривания		
				возвратноточная (2009 г./2017 г.)	прямоточная (2009 г./2017 г.)	комбинированная (2009 г./2017 г.)
Кемеровский	29	11	12	28/7	1/2	0/12
Прокопьевский	48	0	8	45/8	0/0	с помощью ВМП/3
Новокузнецкий	25	10	13	24/3	0/1	1/14
Восточной Сибири	1	0	0	1/0	0/0	0/0
Ростовской области	13	0	0	10/5	3/1	0/0
ОБР ВГСЧ	4	0	0	4/0	0/0	0/0
Урала	1	0	0	1/0	0/0	0/0
Печорского бассейна	9	0	5	1/1	8/4	0/1
Сахалина	1	0	0	1/0	0/0	0/0
Дальнего Востока	4	0	0	2/2	2/1	0/0
ИТОГО:	135	21	38	117/26	14/9	1/30

Таблица 1.8 – Сведения по схемам проветривания подготовительных забоев

ОВГСО	Общее количе- ство забоев	Схемы проветривания подготовительных забоев			Количество шахт с последовательным проветриванием подготовительных забоев
		обособленное		последовательное	
		одиночное	параллельное		
Кемеровский	86	46	39	1	1
Прокопьевский	120	114	6	14	8
Новокузнецкий	105	55	50	2	2
Восточной Сибири	2	0	2	0	0
Ростовской области	29	25	4	4	4
ОБР ВГСЧ	4	3	0	1	1
Урала	3	3	0	1	1
Печорского бассейна	34	32	2	12	5
Сахалина	5	5	0	4	1
Дальнего Востока	14	14	0	1	1
ИТОГО:	402	297	103	40	24

Анализ и динамика распределения количества наклонных ветвей с нисходящим проветриванием и ветвей с опрокидыванием воздушной струи под воздействием тепловой депрессии представлен в таблице 1.9.

Наибольшие темпы роста количества наклонных ветвей с нисходящим проветриванием, а также ветвей, в которых происходит опрокидывание вентиляционной струи под воздействием тепловой депрессии, наблюдались на шахтах, обслуживаемых Прокопьевским ОВГСО, где по сравнению с 2008 годом они составили соответственно 197% и 180%. Также имеет место рост количества таких ветвей по сравнению с 2008 годом на шахтах Восточной Сибири и Печорского бассейна.

Для предотвращения опрокидывания вентиляционной струи воздуха в горных выработках шахт планами ликвидации аварий предусматриваются мероприятия по повышению устойчивости проветривания, и, как правило, это традиционная навеска парусных перемычек или закрытие противопожарных дверей.

Таблица 1.9 – Сведения по количеству наклонных ветвей с нисходящим проветриванием

ОВГСО	Количество наклонных ветвей с нисходящим проветриванием			Количество наклонных ветвей, в которых происходит опрокидывание струи воздуха под воздействием тепловой депрессии		
	2008 г.	2009 г.	+ / -	2008 г.	2009 г.	+ \ -
Кемеровский	480	271	-209	61	38	-23
Прокопьевский	264	520	+256	158	285	+127
Новокузнецкий	н/д	н/д	-	188	183	-5
Восточной Сибири	15	17	+2	15	46	+31
Ростовской области	405	395	-10	102	82	-20
ОБР ВГСЧ	0	2	+2	0	9	+9
Урала	31	0	-31	8	6	-2
Печорского бассейна	185	236	+51	157	183	+26
Сахалина	6	3	-3	0	1	+1
Дальнего Востока	14	3	-11	3	5	+2
ИТОГО:	1 400	1 447	+47	692	838	+146

Анализ и динамика распределения количества выемочных полей на шахтах, проветриваемых по уклонной схеме, представлен в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Распределение количества выемочных полей на шахтах, проветриваемых по уклонной схеме

ОВГСО	Количество выемочных полей, проветриваемых по уклонной схеме		
	2008г.	2009г.	+/-
Кемеровский	7	1	-6
Прокопьевский	0	н/д	-
Новокузнецкий	13	8	-5
Восточной Сибири	4	0	-4
Ростовской области	16	7	-9
ОБР ВГСЧ	0	0	-
Урала	0	0	-
Печорского бассейна	7	4	-3
Сахалина	1	1	-
Дальнего Востока	0	0	-
ИТОГО:	48	21	-27

В целом же, по сравнению с предыдущим 2008 г. наблюдается положительная динамика (-27 или 42% к 2008 г.) по переводу проветривания шахт на бремсберговую схему.

Количественные показатели распределения вентиляционных сооружений, находящихся на угольных предприятиях, обслуживаемых ФГУП ВГСЧ, представлено в таблице 1.11. Как следует из приведенных данных, наибольшее количество вентиляционных сооружений имеется на шахтах Ростовской области (2951 единиц или 26% от общего их количества), а также на шахтах, обслуживаемых Кемеровским ОВГСО (2614 единиц или 23%) и ОВГСО Печорского бассейна (2531 единиц или 23%), что отрицательно влияет на обеспечение надежности и устойчивости проветривания горных работ как в нормальных, так и в аварийных режимах.

Изменения в применяемых схемах проветривания, способах управления газовыделением, применяемом оборудовании – незначительным, общее снижение по отдельным сравниваемым параметрам связано, главным образом, с уменьшением количества действующих угольных шахт.

Таблица 1.11 – Количественные показатели распределения вентиляционных сооружений за 2009 г. и 2017 г.

ОВГСО	Вентиляционные сооружения				
	Всего (2009 г./2017 г.)	Перемычки		Регуляторы (2009 г.)	Шлюзы (2009 г./2017 г.)
		глухие (2009 г./2017 г.)	с дверью (2009 г.)		
Кемеровский	2614/2039	935/944	747/нет данных	141/нет данных	791/788
Прокопьевский	255/322	22/141	88/нет данных	43/нет данных	174/136
Новокузнецкий*	1173/1582	496/635	513/нет данных	148/нет данных	521/611
Восточной Сибири	117/53	9/16	81/нет данных	7/нет данных	20/34
Ростовской области	2951	2314	572/нет данных	92/нет данных	545
ОБР ВГСЧ	1257/0	1210/0	31/0	16/0	31/0
Урала	11/0	0/0	0/0	0/0	11/0
Печорского Бассейна	2531/644	2212/477	319/нет данных	0/нет данных	319/103
Сахалина	63/0	8/0	17/0	2/0	19/0
Дальнего Востока	269/514	200/328	25/нет данных	5/нет данных	17/27
ИТОГО:	11241/8105	7406 / 4855	2393	454	2448/2244

Существенно уменьшилось количество применяемых газоотсасывающих установок, что можно связать с низкой эффективностью их работы, снижением аэрологической безопасности, росту риска эндогенных пожаров и взрывов метана и сложным управлением применяемого способа газовыделения. Схемы

проветривания выемочных участков угольных шахт преимущественно возвратноточные при столбовой системе разработки. Общий способ проветривания угольных шахт и проходческих забоев нагнетательный. Всасывающий способ проветривания тупиковых горных выработок не применяется ввиду отсутствия нормативно-методической базы, регламентирующей порядок вентиляции, на что делает ссылку Ростехнадзор.

1.3. Анализ состояния вентиляции рудников Российской Федерации

На всей территории Российской Федерации залегает огромное количество различных полезных ископаемых (рисунок 1.8). Ежегодно по геологоразведочным данным происходит их прирост. Добыча полезных ископаемых осуществляется во всех регионах Российской Федерации. Имея самую большую площадь, условия ведения горных работ для разных регионов существенно различаются. Россия занимает первое место в мире по запасам серебра, никеля и железной руды, а также наша страна – мировой лидер по добыче платины, палладия и высокообогащенного урана.

Схемы и способы проветривания рудников существенно зависят от горно-геологических параметров месторождений и применяемой системы разработки. При этом добычу руды подземным способом (шахты и рудники) по схеме вентиляции можно условно разделить на погоризонтную, когда рудное тело, вскрытое стволами, разделяется вентиляционным и откаточным горизонтами (рисунок 1.8). Свежий воздух подаётся до нижнего откаточного горизонта, и далее через вентиляционные восходящие выработки, или через выработанное пространство – на вентиляционный горизонт и далее на поверхность. И второй условный вид схем проветривания соответствует схемам, принятым для угольных шахт или при проходке выработок (при разработке жильных месторождений).

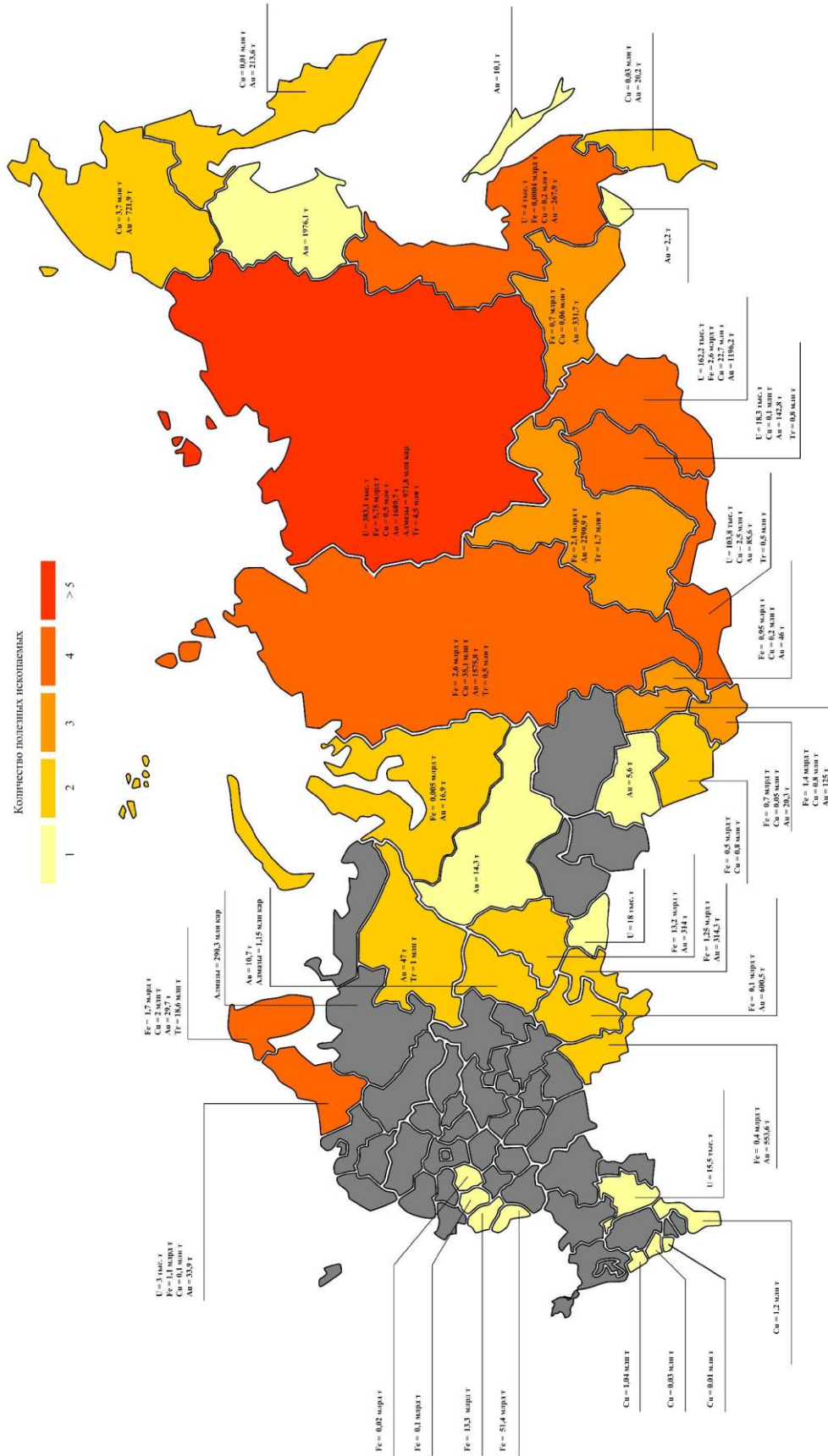


Рисунок 1.7 – Распределение запасов золота (Au), меди (Cu), железа (Fe), алмазов и редкоземельных металлов (Tr)

на территории Российской Федерации

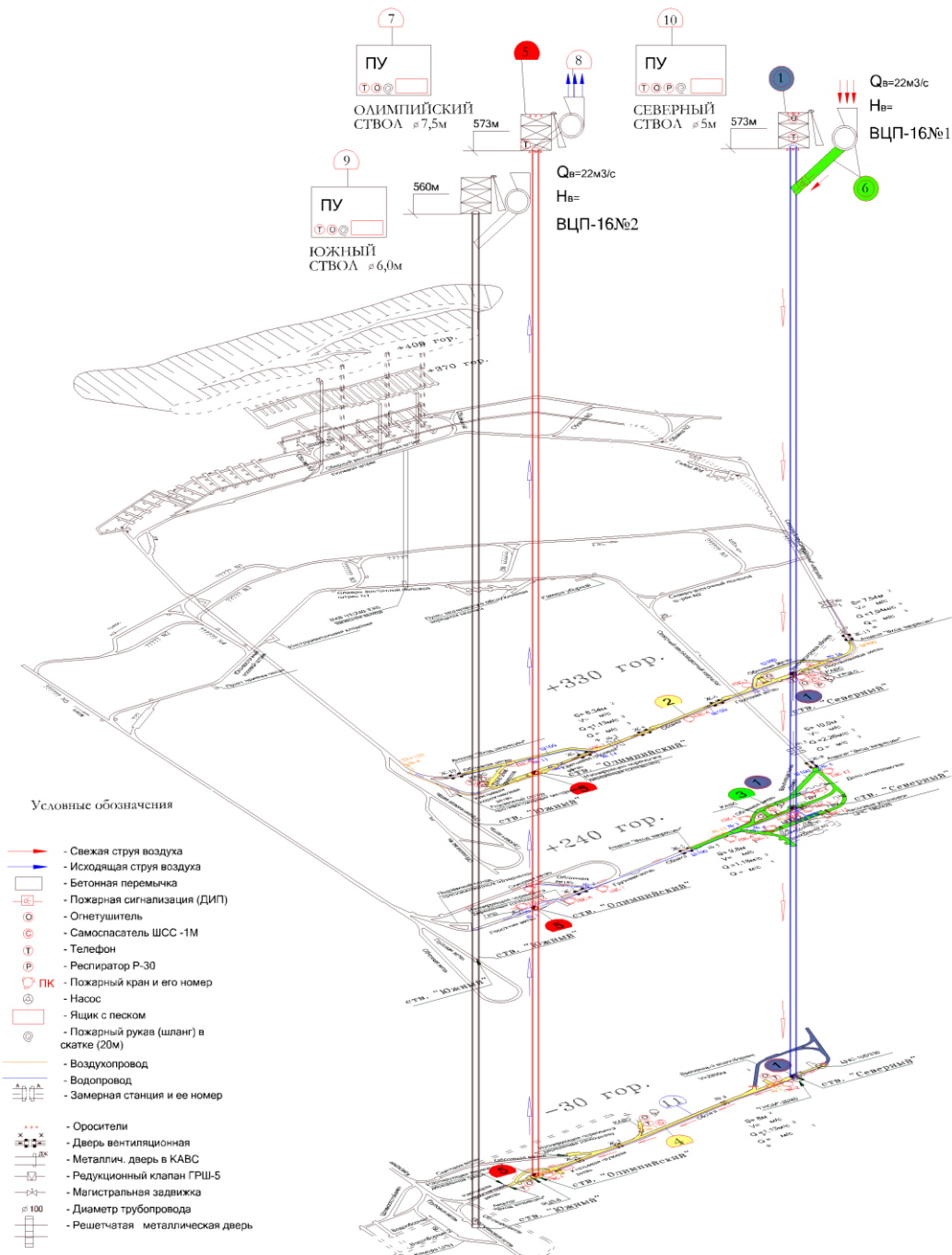


Рисунок 1.8 – Пример погоризонтного проветривания шахт (шахта «Одинокaя»)

Второй отличительной особенностью проветривания рудников является применение камерно-столбовой системы разработки (рисунок 1.9). При выдержанном по мощности пологозалегающем месторождении шахтное поле разделяется на обособленно разрабатываемые блоки, камеры или панели с оставлением в выработанном пространстве целиков. При этом воздух,

попадающий в камеры, требует обособленного направления воздушных струй, для чего часто применяют вентиляторы местного проветривания с дополнительными устройствами (типа трубы Вентури). Расчёт аэродинамического сопротивления камер и учёт их в программных комплексах, применяемых для расчёта воздухораспределения, затруднителен, так как он не позволяет учесть сложные аэродинамические процессы. При этом камеры имеют большие объёмы (например, длина камеры на шахте «Гипс-Кнауф» достигает длину 50 м при площади сечения 100 м^2 (рисунок 1.10), что существенно усложняет их проветривание за счёт диффузии после проведения взрывных работ.

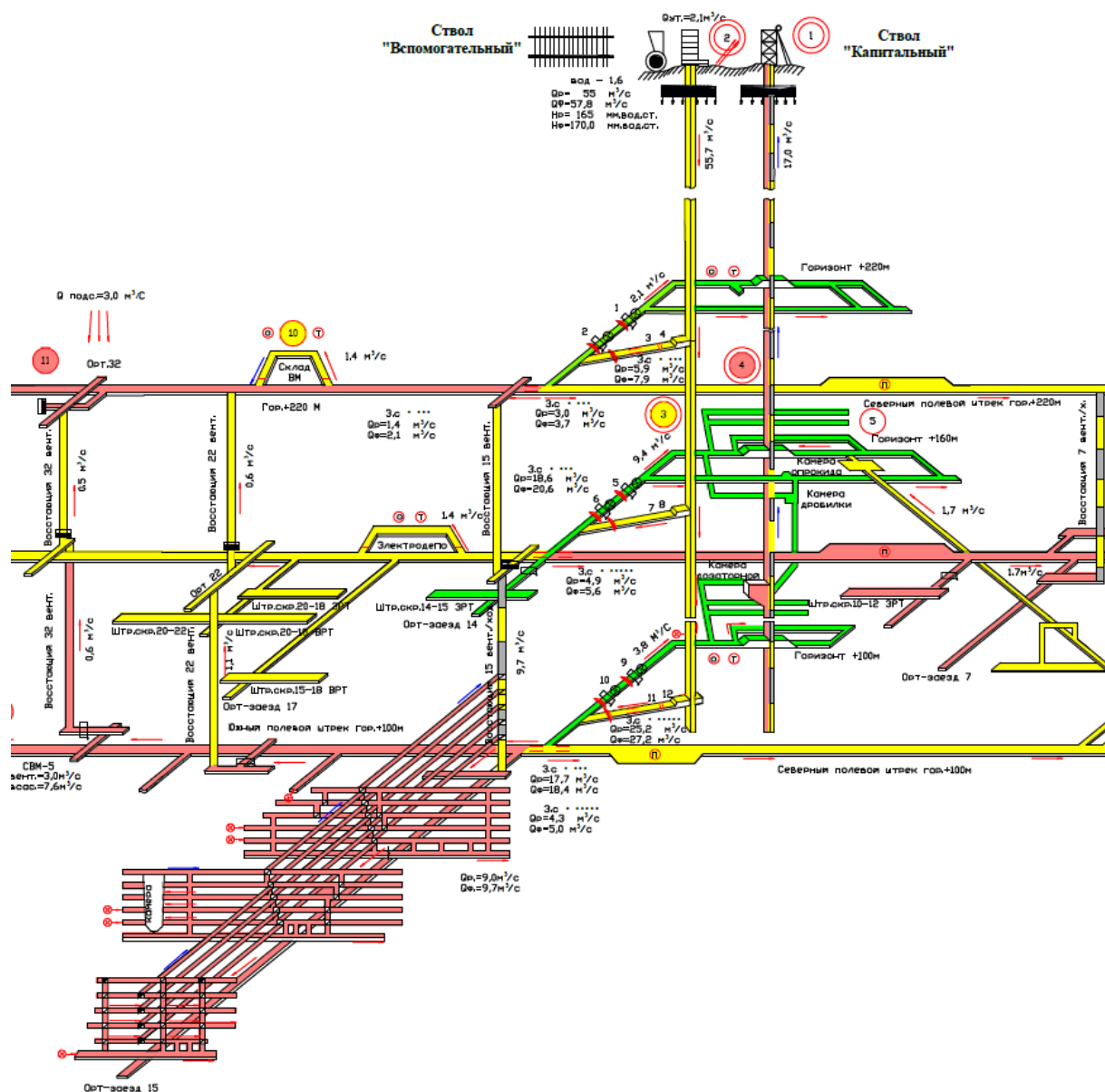


Рисунок 1.9 – Выкопировка схемы проветривания ОАО «Сарановская шахта «Рудная»

трения и местных сопротивлений. Однако, работы по измерениям фактических значений аэродинамических сопротивлений шахтной вентиляционной сети в настоящее время не производятся ни работниками шахт, ни работниками горноспасательных служб. Количество воздуха для проветривания рудников существенно возросло, что требует применение мощных вентиляторов. Например, для рудника «Скалистый» в ближайшее время при ведении работ на глубине 2050 м потребуется воздух в количестве 558,7 м³/с, депрессия при таком расходе воздуха будет доходить до 600 мм вод. ст. Существующие сегодня вентиляторы могут создавать большое давление (900 мм вод. ст.) и обеспечивать горное предприятие воздухом в количестве до 2000 м³/с. К таким условиям требуются специальные проекты вентиляции, которые должны контролироваться проектными организациями. И в случае отклонения горно-технологических условий от запроектированных параметров, проект вентиляции должен пересматриваться в кратчайшие сроки для обеспечения аэрологической безопасности [117].

1.4. Анализ степени опасности вентиляции шахт и рудников

По угольным шахтам на 2012 г., по имеющейся статистике, только в 15% шахт не обнаружен метан, по остальным категориям метанообильности шахты распределены равномерно (рисунок 1.11).

По данным доклада, доля добычи угля из шахт, опасных по метану, внезапным выбросам и горным ударам, – 90%. Доля пластов, опасных по взрывчатости угольной пыли, – 91%. Доля пластов, склонных к самовозгоранию, – 61%. Доля пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа, – 49%. Доля пластов, опасных по горным ударам, – 22%. Средняя глубина добычи угля подземным способом – 400 метров.



Рисунок 1.11 – Распределение угольных шахт по метанообильности

Метанообильных рудников в Российской Федерации в 5 раз меньше, чем угольных шахт, всего 15 % от общего числа рудников.

По данным Ростехнадзора (рисунок 1.12), видно, что количество добываемого угля растёт, при этом число травмированных и погибших горнорабочих остаётся постоянным. Также следует отметить, что здесь не включены аварии, произошедшая на шахте «Северная» (2016 г.), в которой погибло 36 человек. Из данного графика отчётливо видны аварии, в первую очередь, связанные с аэрологическими факторами, которые происходят раз в три года. И так происходит на протяжении последнего десятилетия, что позволяет предполагать время возникновения следующих крупных аварий.

Снижение травматизма и количества аварий на горных предприятиях России обусловлено разными причинами. Среди них особенно необходимо выделить то, что на законодательном уровне изменили перечень аварий, принимаемых к учёту официальной статистикой. Также не все сведения по авариям и инцидентам (например, загазированиям) попадают в государственную статистику и вообще доступны для анализа, что существенно снижает уровень безопасности ведения горных работ (особенно по аэрологическим факторам).

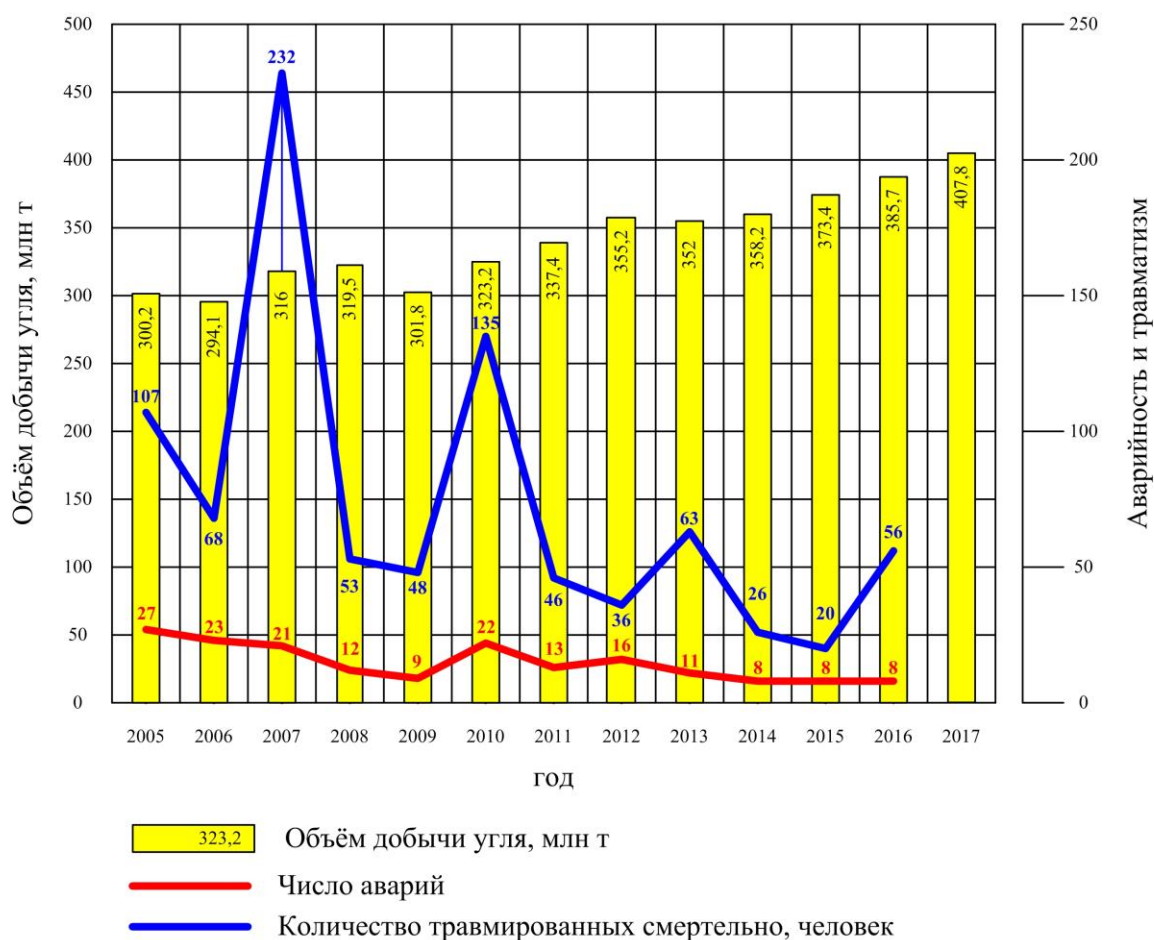


Рисунок 1.12 – Динамика добычи, аварийности и травматизма со смертельным исходом в угольной промышленности на 1 января 2017 г.

Распределение аварий на угольных шахтах России по видам за последние пять лет (рисунок 1.13) показывает определённую стабильность по таким авариям, как обрушения и затопления. А аварии, связанные с взрывами, имеют циклический характер, что говорит о системных проблемах в аэрологической безопасности горных предприятий.

Причины взрывов на угольных предприятиях часто связаны с нарушением предусмотренных проектно-технической документацией решений в части управления газовойделением: необеспечением участка расчётным количеством воздуха, необходимого для разбавления метана из источников метановыделения; образованием слоевых и местных скоплений; отсутствием надлежащего контроля инженерно-техническими работниками шахты

состояния промышленной безопасности и низким уровнем производственного контроля на выемочном участке и шахте в целом.

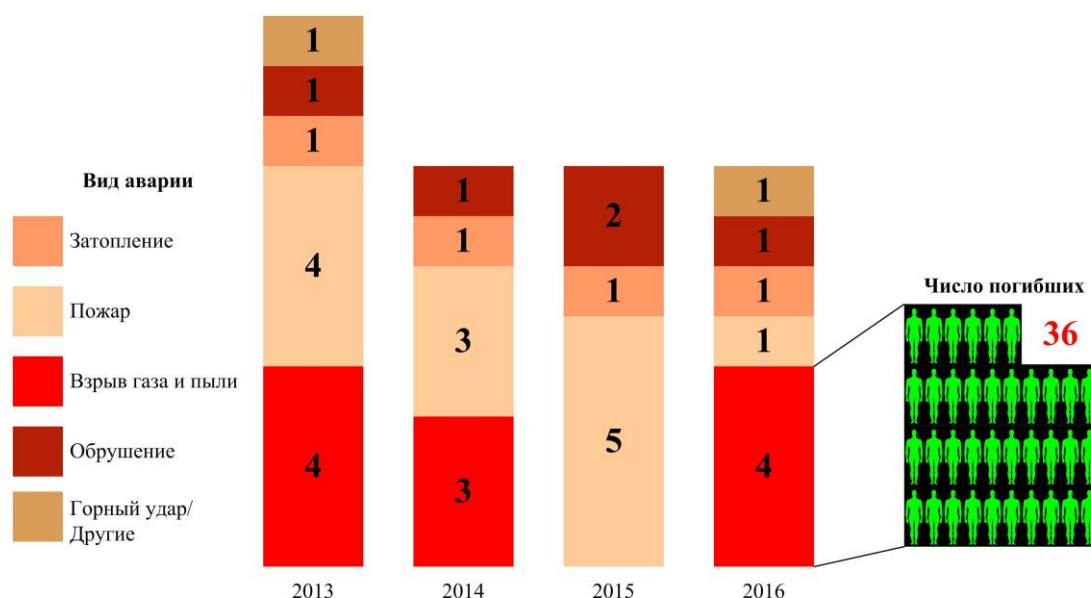


Рисунок 1.13 – Распределение аварий по видам за 2013-2016 гг.

Непринятие должностными лицами шахты мер по нормализации газовой обстановки на выемочном участке, ненадлежащий контроль состояния проветривания горных выработок и дегазации, отсутствие ведения профилактических работ, – также приводят к аварийным ситуациям и инцидентам.

Аварии, связанные с аэрологическими факторами, на горных предприятиях, разрабатывающие рудные месторождения, происходят редко. За последние годы был один случай взрыва метана на руднике «Заполярный» в Норильске 7 июля 2017 года, погибло три человека. Однако, вопросы обеспечения аэрологической безопасности в рамках, обусловленных санитарно-гигиеническими нормами и правилами, весьма актуальны и для рудников. Горные работы ведутся в условиях высоких температур и интенсивного образования вредных газов от машин с двигателями внутреннего сгорания, взрывных работ, а также рудничной пыли.

1.5. Современные направления и проблемы развития рудничной вентиляции

Развитие рудничной вентиляции идёт в нескольких направлениях, к основным можно отнести:

- 1) создание интеллектуальной автоматизированной системы контроля и управления проветриванием (в рамках многофункциональной системы безопасности в соответствии с 41-м параграфом Правил безопасности [2, 194, 250]);
- 2) разработка новых и усовершенствование существующих программных средств для расчёта воздухораспределения по горным выработкам горных предприятий [3, 34, 50, 152, 165, 166, 190, 191, 286];
- 3) создание более совершенного вентиляционного оборудования и устройств [74], приводящих в движение воздушные массы (более мощные вентиляторы, эжекторы [104], пульсаторы [242-244, 251-255, 264], генераторы импульса давления [84, 86]); обогревающих и охлаждающих воздух [116 149, 160], пылеотсасывающих установок [169, 202]; высоконапорных вентиляционных трубопроводов [21, 22]; устройств нейтрализации вредных газов [167] и др.

Все направления активно развиваются отечественными учёными и производителями.

1.5.1. Интеллектуальное автоматизированное проветривание

На современных предприятиях стремятся создать интеллектуальное автоматизированное проветривание. Этим занимаются коллективы из Горного института УрО РАН [131], Московского горного института [193, 195] и другие. Данная тенденция отмечается на всех типах горных предприятий: при добыче полезных ископаемых, при строительстве шахт и рудников и при эксплуатации подземных сооружений (метрополитен, коллекторы и т.п.).

Системы автоматизации проветривания позволяют оперативно реагировать на изменяющиеся параметры рудничной атмосферы, такие как температура, влажность и загазирование. При этом также производится экономия средств на ручном управлении.

Следует отметить имеющийся опыт создания автоматизированного интеллектуального проветривания в СССР на шахте «Коммунист». В работе принимали участие Московский горный институт и ФГУП НИИ Гипроуглеавтоматизация. В рамках работы были проведены большие теоретические исследования, наработаны практические решения и была изготовлено оборудование и проведено опытно-промышленное внедрение системы оперативного автоматического управления системой вентиляции газообильных шахт. В этой работе были предложены различные способы получения средних скоростей движения воздуха и концентрации газа по сечению. Численное моделирование этих способов показало высокую сходимость с лабораторными и шахтными исследованиями [33, 68, 201, 210, 213, 214, 321, 359].

Математическое моделирование проветривания горных выработок, проводимое в Московском горном институте НИТУ «МИСиС» под руководством В.К. Ушакова [12, 233] и в Тульском государственном университете под руководством Н.М. Качурина [40, 76-77, 315], показывает актуальность развития новых методов изучения аэрогазодинамических процессов.

Одним из последних научно-технических решений в области улучшения вентиляции рудников являются работы коллектива Горного института УрО РАН под руководством Л.Ю. Левина [128] ими разработаны теоретические основы, программный комплекс и технические устройства позволяющие увязать в единую систему расчёт и контроль воздухораспределения на основе специализированного программного комплекса «Аэросеть» [172].

Используемые на практике компьютерные программы по расчёту воздухораспределения предусматривают ручной ввод исходных данных. При

этом достоверность результатов расчёта зависит от точности измерения и определения фактических аэродинамических параметров горных выработок.

Сегодня на многих горных предприятиях модели шахтных вентиляционных сетей для расчёта воздухораспределения могут не соответствовать фактическим значениям. Зачастую происходит «подгонка» исходных данных для программ воздухораспределения к результатам ручного контроля параметров рудничной атмосферы. Делают это путём перебора коэффициента аэродинамического сопротивления трения.

Поэтому, впервые в мире российскими специалистами была разработана система, позволяющая передавать данные со стационарных датчиков контроля скорости движения воздуха в компьютерную модель расчёта воздухораспределения «Аэросеть» (рисунок 1.14). На основании полученных данных автоматически происходит перерасчёт, кроме того программой анализируется работа стационарных датчиков скорости движения воздуха, определяются неисправные датчики, их оптимальное количество и места установки – конкретные горные выработки.

В настоящее время система проходит испытания на руднике «Таймырский», г. Норильска.

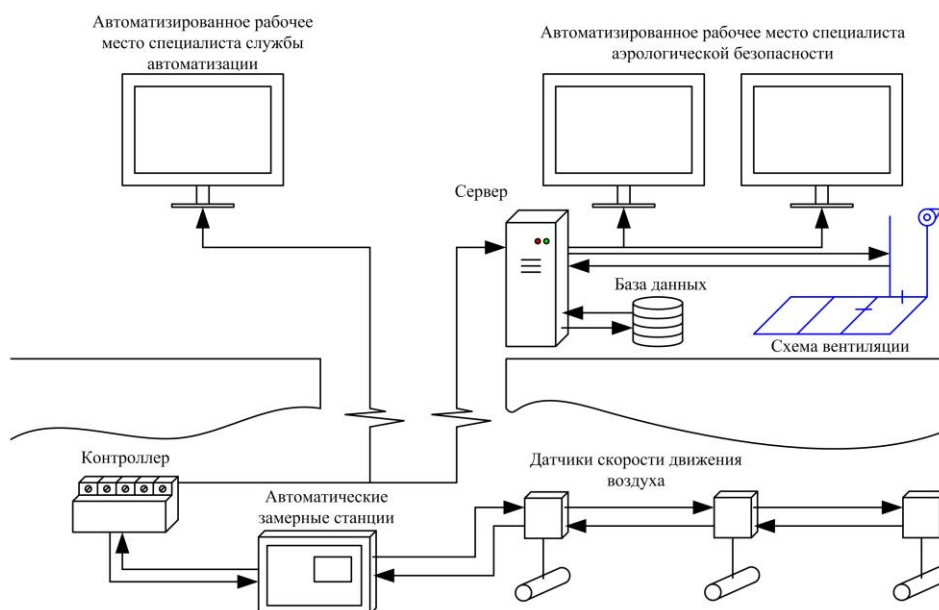


Рисунок 1.14 – Алгоритм работы системы датчиков скорости движения воздуха – программа воздухораспределения [128]

1.5.2. Программное обеспечение в рудничной аэрологии

В настоящее время существует более десятка специализированных программных средств по вентиляции (перечень программ приведён в приложении 1), работающих на персональных компьютерах небольшой производительности.

В основе всех программ лежат сетевые законы Г. Кирхгофа [318]. Программы имеют различные интерфейсы и набор дополнительных модулей. Так программное обеспечение «Аэросеть», разработанная специалистами Горного института УрО РАН, имеет дополнительные модули, учитывающие: теплообмен с горным массивом, местные сопротивления, естественную тягу, тепловую депрессию, сжимаемость воздуха и влагообмен.

Основная программа, используемая почти на всех угольных шахтах России «Вентиляция 2.0», включает дополнительные модули, такие как, расчёт ударно-воздушных волн, задымления горных выработок, водоотлива и электроснабжения.

Практически все программы позволяют создавать графическую и оперативную часть Плана мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий, осуществляют расчёт времени движения горнорабочих и бойцов ВГСЧ в аварийных ситуациях, определяют оптимальный маршрут.

Все программы постоянно развиваются. В них включаются дополнительные модули. Постоянно улучшается интерфейс, графика, представление результатов расчётов и многое другое. Российские разработчики на много опередили зарубежных коллег.

При этом важно отметить, что разработанные отечественные программные продукты учитывают российские правила, нормы, инструкции и рекомендации. Так, в программном комплексе «Аэросеть» все условные обозначения вентиляционных сооружений, вентиляторов, калориферов, толщина линий и т.д. соответствуют ГОСТам [36].

Отдельным направлением развития в области расчётов вентиляции в настоящее время является численное моделирование с применением специализированных компьютерных программ, таких как Ansys CFD, Ansys Fluent, FlowVision, CalculiX, VNETPC и др. [118]. Оно активно применяется в основном для проведения научных исследований, и решения проблем вентиляции локальных объектов. Для расчёта воздухораспределения в шахтных вентиляционных сетях пока не применяется, хотя попытки имеются [99].

В этом направлении следует отметить работы, выполненные в НМСУ «Горный» под руководством С.Г. Гендлера Так, решены задачи температурного режима железнодорожных тоннелей, позволяющие подобрать оптимальные режимы проветривания, которые не позволяют образовываться наледи (работы С.В. Синявиной [24, 28, 29]). Предложена методика выбора специальных технических устройств (эжекторов), улучшающих проветривание тоннелей при их строительстве (работы Е.А. Савенкова [30-33, 130]). Результаты численного моделирования в данных работах широко применяются для обоснования безопасных режимов вентиляции. При этом показана высокая сходимость результатов расчёта с натурными экспериментами.

В ГИ УрО РАН также активно используют численное моделирование для подтверждения своих теорий, получения зависимостей для дальнейшей их реализации [23, 56, 142, 266, 321], для улучшения проветривания калийных рудников России и Белоруссии, а также для рудников Норильска. Здесь следует отметить исследования М.А. Сёмина [212, 213], где применено численное моделирование влияния местных сопротивлений при реверсировании. При проведении численного моделирования на начальном этапе проводились лабораторные измерения и верификация результатов. А потом проводились натурные измерения.

Под руководством Д.Ю. Палеева разработаны численные методы решения задач проветривания горных выработок с выработанным пространством угольных шахт [13, 35, 174-178], результаты использованы при разработке программного комплекса «Вентиляция» [179].

В Шахтинском институте (филиал) ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова под руководством Е.А. Колесниченко проводятся исследования по совершенствованию проветривания метанообильных угольных шахт [119-122], выемочных участков и тупиковых выработок [5, 126, 161]. И.Е. Колесниченко разрабатываются основы безопасной разработки метаноносных пластов [123-125].

Вопросы аэрогазодинамики выработанных пространств угольных шахт на высоком уровне решаются в МГИ под руководством Л.А. Пучкова [193, 196, 197]. Также в МГИ под руководством Н.О. Калединой исследования с применением численного моделирования проводятся с 2011 г. [64, 67, 68, 92-94]. В основном они касаются области управления метановыделением. Особое внимание в работах уделяется аэрогазодинамике выработанных пространств, здесь стоит выделить работы выполненные автором [85, 88, 95]. Численное моделирование применяется для оценки способов проветривания тупиковых горных выработок угольных шахт [65, 66, 316]. Для изучения и создания пульсирующей вентиляции – в работах А.С. Кобылкина [62, 84, 86, 89, 90].

В других странах также активно используют численное моделирование для проведения научных исследований, и так же, как и в России – для отдельных локальных объектов вентиляционной системы (призабойной пространство, горная выработка, местное сопротивление и т.п.). Так, например, в работе специалистов из Чили [287, 288] используется численное моделирование воздухораспределения в камерах шахты Rancagua. В работе польских учёных численное моделирование применяется для исследования местных сопротивлений [314] и выработанных пространств [300, 344, 345, 351, 359, 364, 366].

Но развитие процессов информатизации и компьютеризации расчетов проветривания горных предприятий не затрагивают методологию проектирования вентиляции.

1.5.3. Развитие технических устройств, обеспечивающих проветривание шахт и рудников

Технические устройства, обеспечивающие проветривание горных предприятий, (вентиляционные устройства) весьма различны. Их можно условно разделить на 4 группы (рисунок 1.15).

К устройствам, обеспечивающим движение воздуха, можно отнести вентиляторы, эжекторы, газоотсасывающие установки и насосы. Современные установки для проветривания развиваются стремительным образом, от небольших легких (менее 1 кг) эжекторов, работающих на сжатом воздухе (рисунок 1.16) до осевых вентиляторов с диаметром рабочего колеса 5,3 м (рисунок 1.17). При работе данного вентилятора при всасывающем способе проветривания плотность воздуха уменьшается до $1,13 \text{ кг/м}^3$, а при нагнетательном способе проветривания плотность воздуха увеличивается до $1,62 \text{ кг/м}^3$. У современных вентиляторов изменение режимов работы вентилятора осуществляется при помощи изменения угла установки лопаток гидравлической системой. Поворот лопаток происходит непосредственно во время работы вентилятора, что позволяет выполнять реверс воздушной струи без изменения направления вращения вала и остановки вентилятора путём поворота лопаток на 90 градусов. Диапазон регулирования производительности 45-100%.

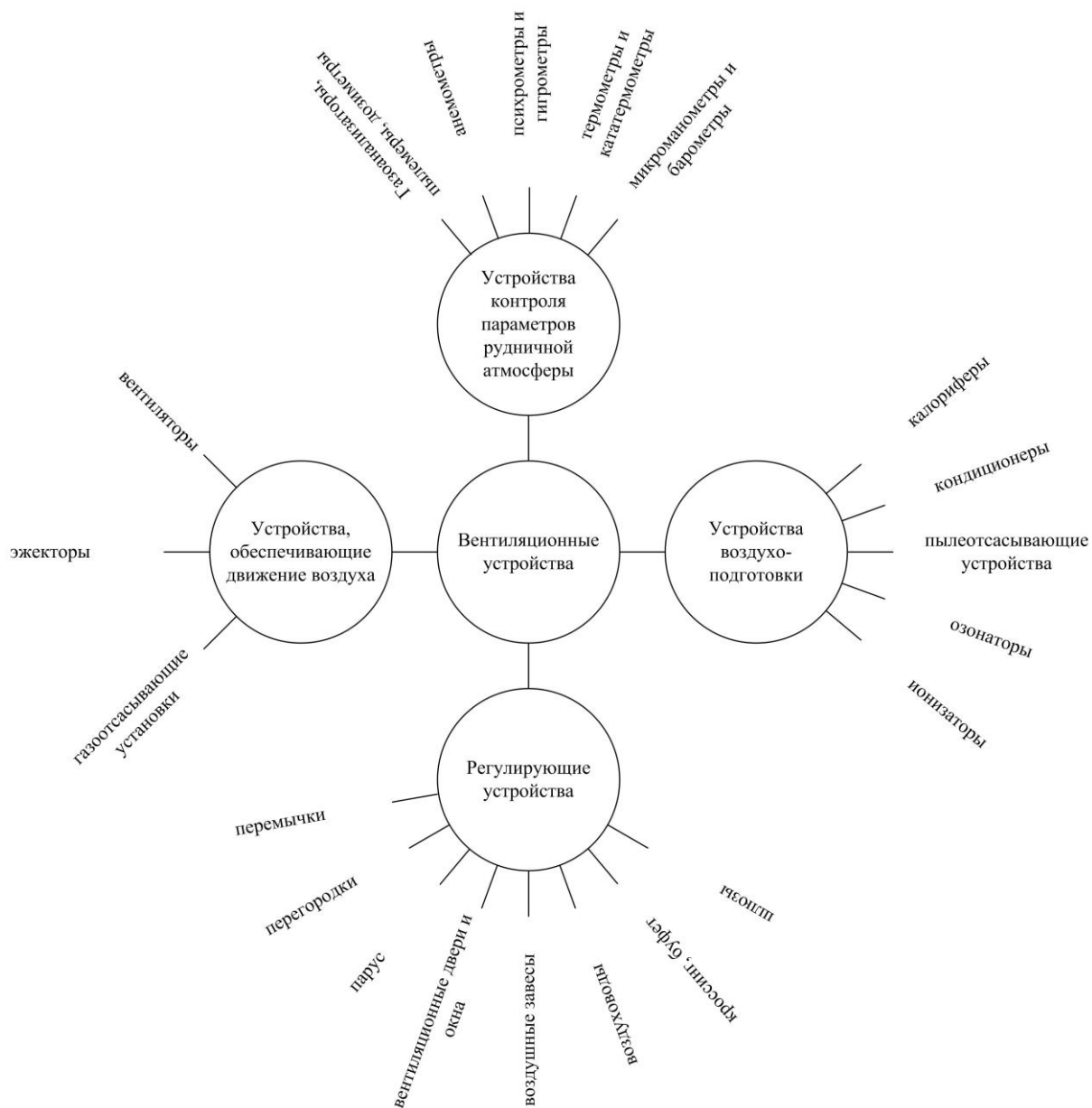


Рисунок 1.15 – Группы вентиляционных устройств

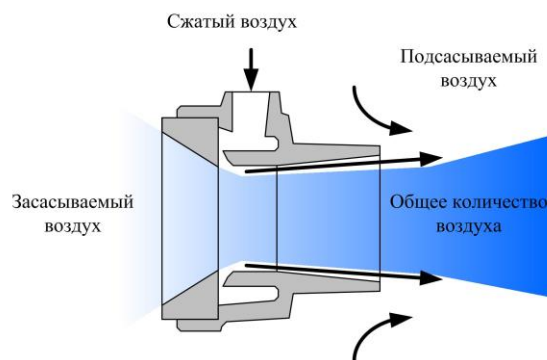


Рисунок 1.16 – Эжектор Air Mover TX-8AM Texas Pneumatic Tools INC внешний вид и принципиальная схема работы



**Рисунок 1.17 – Осовой вентилятор Howden 530YY+9HKE
с диаметром рабочего колеса 5,3 м**

Современные средства прототипирования позволяют создать вентиляторы с любыми характеристиками. Следовательно, сегодня можно создать вентилятор или эжектор, которые будут работать в нужном диапазоне как по депрессии, так и по расходу с минимальными затратами, на весь период службы горного предприятия или подземного сооружения. Остаётся только правильно задать необходимую депрессию и расход воздуха.

В целом достигнутый уровень вентиляторостроения обеспечивает потребности современных шахт и рудников. Однако, есть недостатки. Так разные заводы выпускают под одной маркой вентилятор, имеющий различные аэродинамические характеристики. Систематизированный общий каталог устройств и их рабочих характеристик отсутствует. Всё это усложняет процесс проектирования.

1.6. Нормативно-методическая база по проектированию вентиляции

Нормативно-методическая литература по проектированию горных предприятий, и в частности вентиляции шахт, в нашей стране всегда базировалась на результатах многолетних научных исследований закономерностей протекания сложных физико-механических и физико-химических процессов, развивающихся в массиве горных пород при ведении горных работ.

Большой вклад в развитии методологии проектирования горных предприятий внесли выдающиеся учёные чл.-корр. РАН Д.Р. Каплунов, доктора технических наук: А.С. Бурчаков, Ю.Ф. Васючков, В.И. Игнаткин, О.И. Казанин, Д.М. Казикаев, В.С. Коваленко, Ю.Н. Кузнецов, Г.Г. Ломоносов, А.С. Малкин, В.В. Мельник, С.С. Резниченко, М.В. Рыльникова, И.Н. Савич, М.И. Устинов. Проектированию вентиляции были посвящены работы академиков РАН А.А. Скочинского, А.Н. Щербаня, чл.-корр. РАН Л.А. Пучкова, доктора технических наук: С.Г. Гендлера, Ю.Д. Дядькина, Б.П. Казакова, Н.О. Калединой, Н.М. Качурин, Ф.С. Клебанов, Е.А. Колесниченко, И.Е. Колесниченко, В.Б. Комарова, А.Е. Красноштейна, А.И. Ксенофоновой, А.С. Курилко, Л.Ю. Левина, Н.Г. Матвиенко, Д.Ю. Палеева, К.З. Ушакова, В.К. Ушаков, Л.А. Шевченко, Ю.В. Шувалова и др.

Однако, изменившиеся политэкономические условия в стране привели к резкому сокращению финансирования централизованных отраслевых научных исследований в системной постановке и, при отсутствии заинтересованности со стороны частных компаний, разрабатывающих месторождения. Решение столь сложной и многоплановой задачи как формирование адекватной нормативной базы проектирования стало весьма затруднительным.

Несовершенство нормативно-методической базы по проектированию и контролю вентиляции угольных шахт в настоящее время является одной из основных причин неудовлетворительного состояния проветривания горных

предприятий, о чём свидетельствуют публикации специалистов [61, 232] и следующий краткий анализ. Сегодня нормативно-методическая база для угольных шахт представлена целым рядом документов [51, 168, 182, 186-189, 245, 246, 248, 250].

Горные работы должны вестись в полном соответствии с вышеперечисленными нормативными документами, хотя по отдельным объектам разрешается при соответствующем научном обосновании отступать от требований нормативных документов.

Из действующих и не переизданных, но используемых документов надо отметить:

1. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт [207, 208].
2. Методические указания по выбору схем проветривания выемочных участков с высокой газообильностью [163].
3. Сборник инструкций к правилам безопасности в угольных и сланцевых шахтах [211].
4. Руководство по проведению воздушно-депресссионных съёмок [206].
5. Временная инструкция по расчёту количества воздуха, необходимого для проветривания рудных шахт [17].

Не переизданные документы имеют важное значение. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт, последний раз переиздавалось в 1989 году [208]. Переработанное и дополненное Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт готовилось двенадцатью ведущими научно-исследовательскими институтами Советского Союза (МакНИИ, ДонУГИ, ВостНИИ, ИГД им. А.А. Скочинского, ВНИИОМШС, ВНИИГМ им. М.М. Федорова, ВНИИГД, ИГТМ АН УССР, «Донгипрошахт», «Днепрогипрошахт», Карагандагипрошахт» и «Сибгипрошахт») на основании научно-исследовательских работ за два десятилетия. По многим разделам данного документа требуется частичная, а по некоторым полная переработка, так как изменились условия ведения горных работ, появились новые технологии и новые знания в области рудничной аэрологии.

Попытки переиздать или адаптировать данное Руководство ведутся научно-исследовательскими институтами и горными компаниями.

Практика последних десятилетий показала, что условия ведения горных работ разные и делать новое единое руководство для всех бассейнов и месторождений нецелесообразно.

Методические указания по выбору схем проветривания выемочных участков с высокой газообильностью [163] единственный по настоящее время нормативный документ, позволяющий с учётом большого числа факторов, как природных, так и технологических, определить схему проветривания выемочного участка, оптимальную длину очистного забоя и производительность. При этом достигается максимальная производительность выемочного участка с высокой степенью безопасности. Здесь сделана попытка учесть взаимное влияние различных факторов с учётом применения газоотсоса, дегазации и дополнительных выработок для управления газовыделением через выработанное пространство. Но документ рассчитан на отработку тонких и средней мощности (до 2 м) угольных пластов пологого и наклонного падения, в расчётах используются различные коэффициенты, адекватность которых в современных условиях не верифицирована, в данном документе имеется много ссылок на Руководство [207].

Современная нормативно методическая база проектирования вентиляции рудников и объектов подземного строительства, как отмечалось выше, практически отсутствует.

Нормативно-методическая база для различных горных предприятий развивается неравномерно. При этом за последние годы из-за крупных аварий на угольных шахтах активно перерабатываются Правила безопасности, появляются новые методические рекомендации и инструкции [51, 168, 182, 186-189, 248, 245, 250].

Для рудников ситуация обратная, здесь Правила безопасности укрупняются, путём объединения в Единые правила (Федеральные нормы и

правила). При этом разработка методических документов по проектированию вентиляции горных предприятий не производится.

В настоящее время также наблюдается проблема в терминологии в области рудничной вентиляции и в условных изображениях на вентиляционных планах и вентиляционных схемах. Нормативных документов, полностью посвященных терминологии по рудничной вентиляции, к 2016 году нет. В Правилах безопасности, в различных законах, инструкциях, методиках, учебниках и других изданиях есть указатели терминов, но зачастую они или ошибочные, или неполные, или противоречат друг другу.

Также при решении задач системного проектирования вентиляции необходимо стремиться к единству требований к параметрам рудничной атмосферы.

Существуют также противоречия между отраслевыми нормами к состоянию атмосферы горных предприятий и санитарным законодательством.

Так, например, санитарными нормами и правилами регламентируются оптимальные и допустимые значения [284], существенно отличающиеся от требований Правил безопасности, что наглядно показано на рисунке 1.18.

Таким образом, нормативная база не даёт чётких методов и способов обоснования технико-технологических решений, касающихся вентиляционных систем.

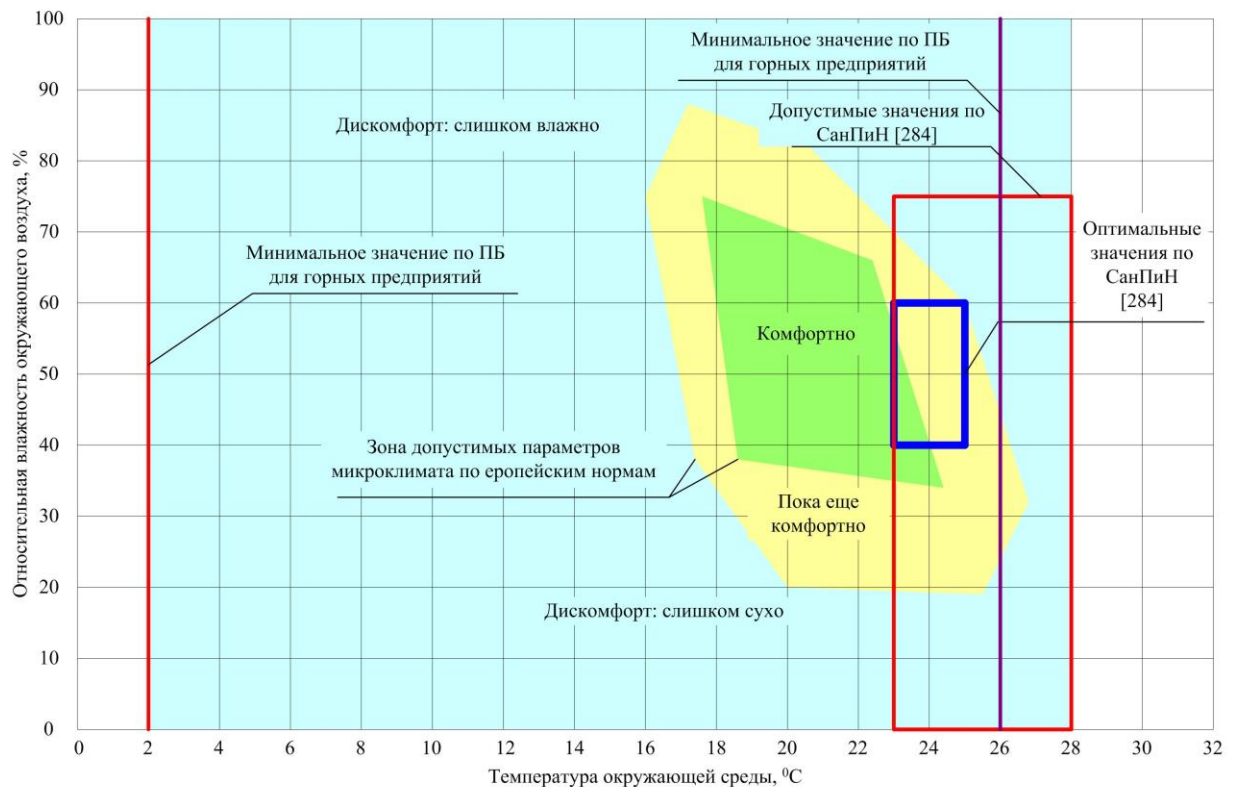


Рисунок 1.18 – Сравнительный рисунок нормативных требований по параметрам атмосферы

Меняется отношение людей к Правилам, теперь появилась возможность самостоятельно принимать проектные решения, при этом за всё несёт ответственность руководитель горного предприятия. В случае аварии или инцидента, руководитель должен будет обосновать, почему он принял именно то, а не другое решение. Поэтому, фактически сделать проект эффективной системы вентиляции без предварительного исследования невозможно.

В целом проблемы проектирования проветривания горных предприятий обусловлены отсутствием соответствующего текущим условиям методологического подхода. Без него нельзя создать безопасную по аэрологическому фактору горнотехническую систему.

Постановка задач исследования. Выводы

Количество угольных шахт в России сокращается. Количество рудников и объектов подземного строительства увеличивается. При этом растёт производительность труда (количество добываемого полезного ископаемого на одного работающего выросло в десятки раз по сравнению с советским периодом) и растёт добыча полезных ископаемых как на угольных шахтах, так и на рудниках. Данная тенденция будет продолжаться в связи с ростом численности населения Земли [196]. Угольные шахты расположены по всей территории Российской Федерации, во всех климатических зонах.

Половина угольных шахт принадлежит крупным компаниям, что обуславливает системный контроль безопасности ведения горных работ и вентиляции в частности. Другая часть шахт представлена как самостоятельные частные организации, что обуславливает низкий уровень научно-методического обоснования проектных решений по организации проветривания и контролю состояния рудничной атмосферы.

В результате, зачастую, качество рудничной атмосферы не соответствует санитарным нормам и правилам (температурный режим не соблюдается, высокая запылённость и наличие в замкнутом пространстве вредных газов (например, от машин с двигателями внутреннего сгорания)), тяжесть последствий связанных с взрывами метана растёт. Проведённый анализ показал, что аэрологические факторы, становятся всё более значимыми в обеспечении промышленной безопасности в целом.

Существенно растёт уровень применяемых технологий в области расчётов вентиляции горных предприятий, программного обеспечения, систем аэрогазового контроля, строительства источников тяги и других вентиляционных устройств. Однако внедряемые технические решения, программное обеспечение и техника не способствуют снижению аварий на горных предприятиях, ведущих подземную добычу полезных ископаемых.

Информатизация и компьютеризация, применяемые в расчёте воздухораспределения, аэрогазового контроля и управления проветриванием, не затрагивают методологию проектирования.

Нормативная и методическая базы сильно устарели и не соответствуют современному уровню производства. Применяемые и вновь вводимые нормативные документы не достаточно обоснованы. В настоящее время разработка актуальной нормативной, методической, справочной, учебной документации в области рудничной вентиляции ведётся медленно и неэффективно, поэтому наблюдается тенденция разработки внутренних стандартов, методических руководств по проектированию вентиляции горных предприятий.

За последний сто лет в стране и за рубежом проведено большое количество исследований, разработаны уникальные приборы контроля параметров рудничной атмосферы, однако эти данные не обобщены ни в учебной, ни в научной литературе. Наблюдается повторное «открытие новых» знаний. При этом катастрофически быстро сокращается число высококвалифицированных научных, педагогических кадров и научно-исследовательских институтов, занимающихся вопросами проветривания горных предприятий.

Для повышения уровня аэрологической безопасности нужно менять методологию проектирования вентиляции шахт. Необходим системный подход. Таким образом, в данной работе поставлена цель – создать методологию системного проектирования вентиляции горных предприятий, учитывающую взаимосвязи и динамику внутренних элементов, свойства системы и её связи с внешними факторами, с учётом развития системы в процессе функционирования (трансформации), базирующуюся на математическом описании физических и физико-химических законов тепломассопереноса в горных выработках, обеспечивающую существенное повышение качества технических решений проектов по обеспечению безопасности подземной

разработки месторождений. Для достижения указанной цели необходимо решение следующих задач:

- 1) рассмотреть и оценить: существующие решения в области проектирования вентиляции шахт и рудников; их научную обоснованность и эффективность с учётом текущего развития горнодобывающей отрасли Российской Федерации; достоверность используемых данных при расчётах вентиляции и при аэрогазовом контроле в период эксплуатации предприятий;
- 2) разработать универсальную математическую модель на единой информационной основе, аналитически описывающую весь комплекс сложнейших процессов тепломассопереноса в рудничных вентиляционных системах, удовлетворяющую принципам системного проектирования проветривания шахт и рудников;
- 3) разработать методологию системного проектирования вентиляции шахт и рудников, а также объектов подземного строительства с учётом применяемых технологий;
- 4) разработать алгоритмы решения различных задач системного проектирования вентиляции шахт и рудников с учётом всех стадий существования горного предприятия;
- 5) разработать порядок реализации системного проектирования вентиляции шахт и рудников.
- 6) апробировать разработанную методологию системного проектирования вентиляции на горных предприятиях.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЁТА СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Расчёт проветривания (вентиляции) горного представляет собой определенную последовательность действий, прописанных в целом ряде нормативных документов, учебной и научной литературе. Наиболее полный порядок действий, выполняемых при расчётах, представлен в Руководстве [207]. Для рудников и объектов подземного строительства такого единого документа нет. Использование Руководства [207] для расчёта проветривания рудников и объектов подземного строительства невозможно из-за особенностей условий ведения горных работ и больших различий в применяемой технологии.

Нет и общего справочника по существующим вентиляционным устройствам: вентиляторам, калориферам, кондиционерам, перемычками и т.д. – с их сравнительными аэродинамическими характеристиками, что усложняет проведение расчётов. Также отсутствуют современные справочники по коэффициентам аэродинамического сопротивления трения и местных сопротивлений горных выработок.

Порядок проведения расчёта проветривания всех подземных объектов (шахт, рудников, тоннелей и т.д.) можно условно разделить на следующие этапы (без учёта сбора данных):

- 1) составление аэродинамической схемы;
- 2) прогноз выделения вредных газов, пыли, избыточного тепла, возможных низких температур, выделений радиоактивных элементов и влаги;
- 3) расчёт по определяющим факторам необходимого количества воздуха, которое нужно подать в систему горных выработок;
- 4) расчёт аэродинамического сопротивления каждого элемента системы вентиляции (сопротивление трения, местные сопротивления и лобовые);
- 5) расчёт воздухораспределения;
- 6) расчёт депрессии, необходимой для преодоления аэродинамического сопротивления шахтной вентиляционной сети;

- 7) расчёт естественной тяги;
- 8) расчёт устойчивости проветривания основных объектов потребления воздуха;
- 9) расстановка вентиляционных устройств по сети горных выработок для регулирования воздухораспределения;
- 10) выбор вентиляторов местного и главного проветривания;
- 11) расчёт энергопотребления вентиляторами;
- 12) расчёт затрат на проветривание;
- 13) расчёт (при необходимости) параметров дегазации;
- 14) расчёт параметров совместной работы вентиляторов, газоотсасывающих и дегазационных установок;
- 15) определение мест установки аппаратуры контроля состояния рудничной атмосферы и системы дегазации.

Расчёт производится на нескольких стадиях строительства и эксплуатации горного предприятия, как минимум его делят на три стадии: период строительства, период наибольшего развития горных работ и на период завершения горных работ. Это делается с целью выбора одного вентиляционного оборудования на весь срок существования горного предприятия, оптимизации обслуживания и сокращения затрат на проветривание. Анализ существующих методик логично произвести в той же последовательности, что и этапы проектирования проветривания подземных объектов.

2.1. Влияние топологии сети горных выработок на проветривание

Топология вентиляционной сети полностью совпадает с планом ведения горных работ предприятия. И именно план ведения горных работ является основой проведения расчётов проветривания. Применительно к нему разрабатывается аэродинамическая схема горного предприятия – условное изображение соединений горных выработок между собой.

Аэродинамическая схема составляется в строгом соответствии с требованиями действующей инструкции [211], изданной в 1964 г. На аэродинамической схеме отображаются все выработки, по которым происходит движение воздуха (сплошные линии, называемые ветвью), и все возможные утечки и подсосы (пунктирные линии). При этом требуется выполнить схему таким образом, чтобы направление воздуха на схеме было односторонним (рисунок 2.1). В других странах данные схемы также используют в расчётах при проектировании проветривания. Примером могут служить схемы, представленные на рисунке 2.2 (КНР, [282]) и на рисунке 2.3 (США, [312]).

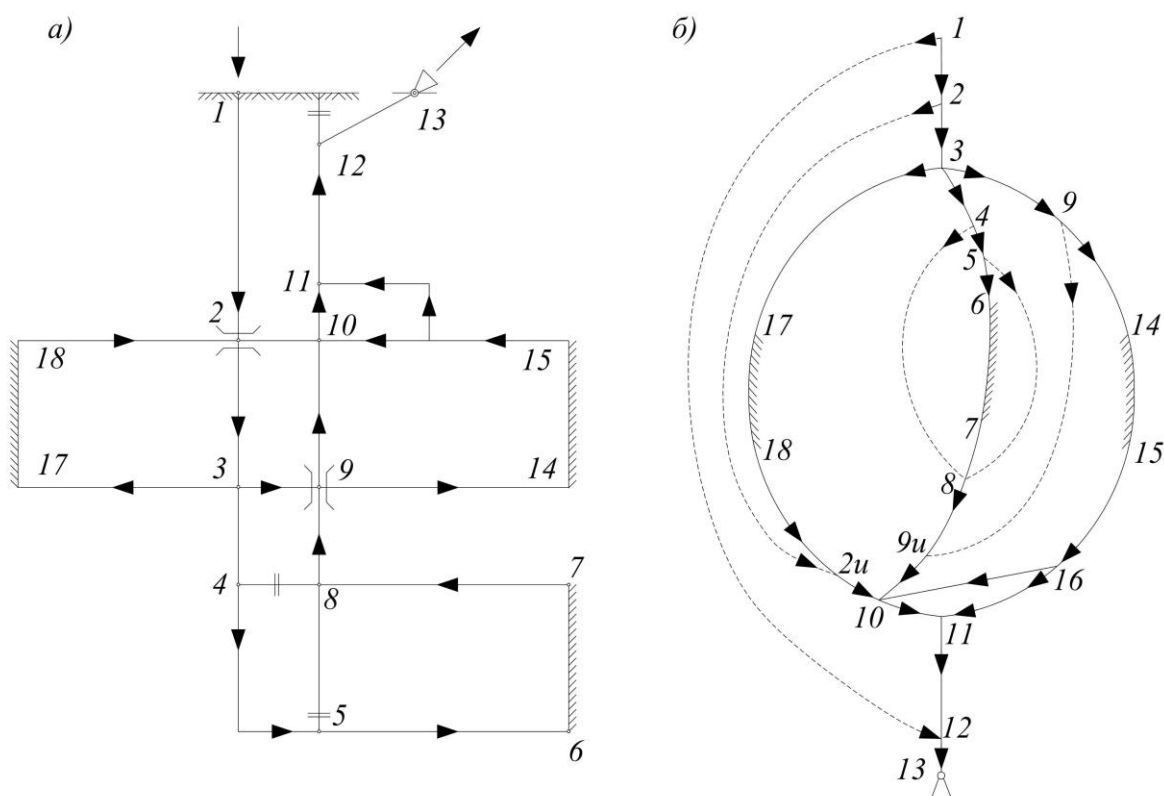


Рисунок 2.1 – Схема вентиляции (а) и её аэродинамическая схема (б) [211]

При этом одной из основных целей построения аэродинамической схемы является нахождение диагональных соединений и оценка их устойчивости, то есть условий, которые могут привести к авариям, связанным с опрокидыванием воздушных струй. Поскольку диагональные соединения снижают надёжность



Составление аэродинамической схемы при проектировании горного предприятия упрощает дальнейшие построения, исключает возможность ошибок в расчёте воздухораспределения, позволяет «лишние» горные

выработки, усложняющие процесс проветривания, снижающие ненадежность и устойчивость. Это, в свою очередь, приводит к снижению затрат на проветривание и повышает безопасность ведения горных работ.

Сегодня на одних горных предприятиях Российской Федерации аэродинамическая схема не составляется вовсе, а на других произошла подмена понятий: вместо аэродинамической схемы специализированными программными средствами, такими как «Вентиляция 2.0», «Аэросеть», «Динавент», «ВентПЛА», и другие составляется компьютерная схема (рисунок 2.4). Как видно, определить по ней наличие диагональных соединений не представляется возможным. В некоторых случаях встречаются упрощенные аэродинамические схемы, что также приводит к грубым ошибкам при проектировании и последующих вентиляционных расчетах. В соответствии с Инструкцией [249] аэродинамическую схему составлять не требуется. Требуется только наносить на вентиляционный план номера узлов и ветвей (если таковые отсутствуют на схеме вентиляции) для дальнейшего использования их при расчёте математической модели шахтной вентиляционной сети на программном обеспечении, упомянутом ранее. Данные расчётов требуется представлять в табличном виде.

Таким образом, смысл аэродинамической схемы, заключающийся в контроле правильности составления плана горных работ для обеспечения аэрологической безопасности, потерян.

Топология шахтной вентиляционной сети, то есть взаимное расположение, сопряжение горных выработок и их отклонение от первоначального положения, оказывает прямое влияние на процесс проветривания горных предприятий. Также изменения геометрических параметров выработки создают сопротивление движению воздуха, и классифицируются как местные сопротивления. Местные сопротивления, обусловленные тем, что поток воздуха несет дополнительные потери при преодолении внезапных сужений, расширений, поворотов (отклонений от первоначального направления движения), первоначально изучались В.Б.

Комаровым в ЛГИ [127, 220, 221], А.А. Харёвым [259]. Ими определены коэффициенты и составлен каталог часто встречающихся видов местных сопротивлений.

Как правило, в современных программах расчёта воздухораспределения поворот как местное аэродинамическое сопротивление заменяют эквивалентной выработкой [222], однако, как показывают исследования Л.Ю. Левина и М.А. Сёмина [156, 245], при изменении направления движения воздушной струи меняется и значение перепада давления на местном сопротивлении. Также в настоящее время совсем не учитывается угол наклона местного сопротивления относительно горизонтальной плоскости. Для сложных видов местных сопротивлений – повороты с изменением типа крепи, соединение нескольких горных выработок и т.п. – нет справочных коэффициентов местных сопротивлений.

На аэродинамической схеме местные сопротивления приурочены к узлам – точкам в которых меняются параметры горных выработок, имеется поворот или сопряжение нескольких выработок.

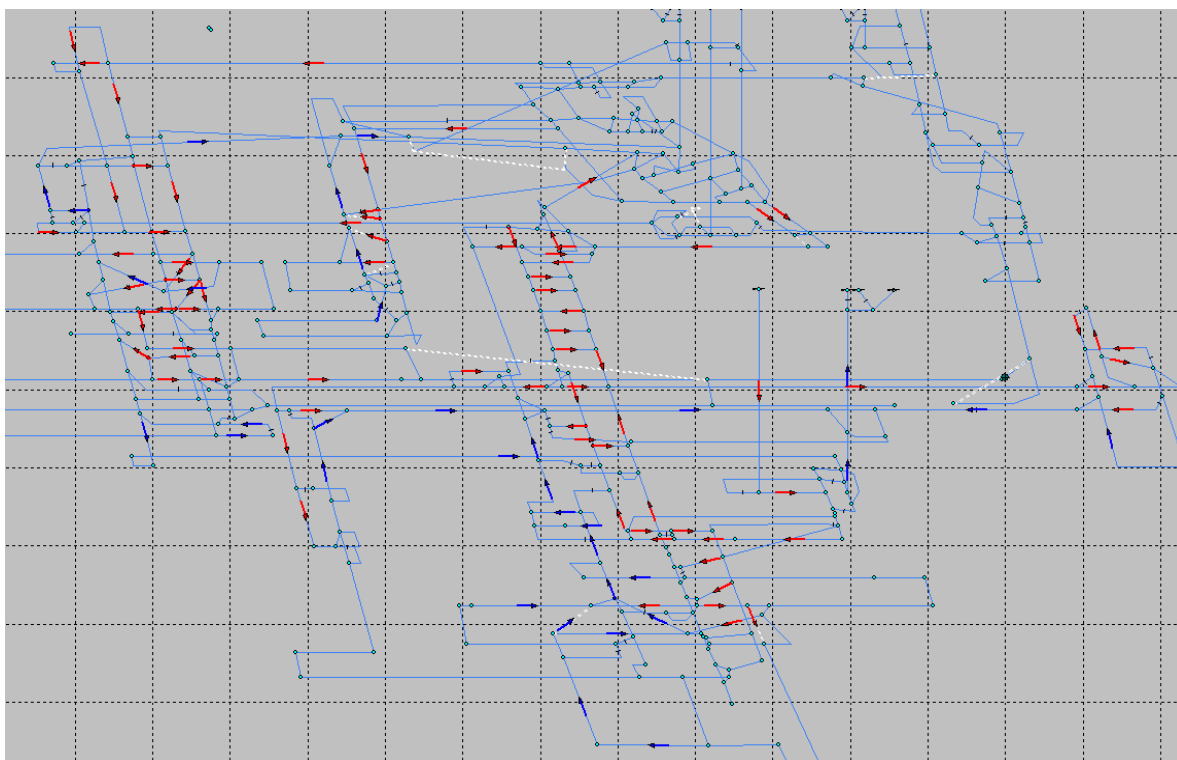


Рисунок 2.4 – Пример схемы вентиляции рудника из программы ВентПЛА

О важности отмеченных элементов проектирования вентиляции шахт говорит пример, шахты «Осинниковская», одного из старейших угольных предприятий Кемеровской области, основанного в 1950 г. Шахтное поле филиала шахты «Осинниковская» объединяет поля шахт «Высокая», «Тайжина», «Кузбасская», «Капитальная1-2», связанные одной вентиляционной сетью. Шахта «Тайжина», созданная на горном отводе ликвидируемой шахты «Высокая», была закрыта в 2004 г., после взрыва газовой смеси, при котором погибли 41 горнорабочий, а четверо получили тяжелые травмы. Уже только по результатам этой аварии можно судить о несовершенстве схемы проветривания и методов борьбы с газовыделением. Анализ аэродинамической схемы шахты «Осинниковская» показал наличие более сотни диагональных выработок, снижающих процесс проветривания. Проблемы проветривания здесь пытались решать, применяя новые вентиляционные установки главного проветривания, газоотсасывающие установки и дегазацию, что при несовершенной схеме соединений вентиляционной сети не только удорожает проветривание, но и снижает его устойчивость, т.е., в конечном счёте, негативно влияет на аэрологическую безопасность.

В итоге следует отметить, что топология шахтной вентиляционной сети имеет прямое влияние на надёжность проветривания, на безопасность ведения горных работ и на стоимость вентиляции. Следовательно, при системном проектировании учёт геометрических параметров выработок и анализ аэродинамической схемы необходимо производить на самом раннем этапе, закладывая оптимальные пути движения воздуха по сети горных выработок, при которых влияние местных сопротивлений будет минимальным.

2.2. Прогноз и расчёт выделения вредных примесей

Основное назначение вентиляции – обеспечение требуемого состава воздуха. Одним из основных элементов проектирования вентиляции является прогноз возможных выделений вредных или опасных примесей в атмосферу

горных выработок (рисунок 2.5). Поэтому расчёт газо-, пыле-, тепло-, влаговыделения, а также выделения радиоактивных частиц, должен предшествовать расчёту количества воздуха, необходимого для их разбавления.



Рисунок 2.5 – Факторы, изменяющие состав рудничной атмосферы

Расчёт газовыделения может производиться при проектировании горного предприятия по геологоразведочным или по фактическим данным.

От качества и количества исходных значений зависит точность прогноза. При этом следует отметить, что получаемые данные не всегда могут отражать действительное положение дел. По геологоразведочным данным прогноз осуществляется в соответствии с Руководством [207] на основе эмпирических зависимостях установленных в 60-70 гг. прошлого века. Попытки усовершенствовать методики прогноза путём корректировки природной газоносности при использовании эмпирических формул как аналитических не имеют смысла.

Расчёт по фактическим значениям в процессе ведения горных работ является более достоверным, чем при прогнозе с использованием эмпирических методик, однако для его осуществления требуется проведение измерений и обработки большого количества параметров (скорости движения воздуха, параметров горных выработок, концентрации газов, температуры, влажности,

давления). Эти измерения необходимо производить в ручном режиме. Автоматические системы контроля не обеспечивают необходимой достоверности информации из-за отсутствия синхронизированного, систематического сбора и обработки огромного массива получаемых данных с разных систем аэрогазового, технологического и внешнего контроля. В условиях интенсивного ведения горных работ места установки приборов и датчиков стационарных систем контроля, рекомендованные в нормативных документах [182], не позволяют определить ни динамику газового баланса, ни возможные скопления газов, ни превышения температуры и скорости движения воздуха. Места, опасные по скоплениям газов, определяются персоналом шахты самостоятельно и существенно зависят от квалификации сотрудников.

Методики определения динамики фактического газового баланса по источникам газовыделения в действующей нормативной базе отсутствует. Часто на практике разделить источники газовыделения очень сложно или невозможно, не только для выемочных участков со сложными вентиляционными схемами, но и при строительстве капитальных горных выработок. Так, исследования, проведённые при строительстве шахты «Глубокая» рудника «Скалистый», показали (рисунок 2.6-2.8), что газовыделение происходит постоянно с различной интенсивностью из различных источников и от разных технологических операций (погрузка породы, бурение, подъём горной массы и т.п.).

В действующих нормативных документах для угольных шахт [207], регламентирующих расчёт величины газовыделения, делается упор только на метановыделение и выделение углекислого газа из массива горных пород. Вопросы выделения других газов из других источников не рассматриваются подробно. Это привело к тому, что в настоящее время существует большое количество зависимостей для расчёта необходимого количества воздуха.

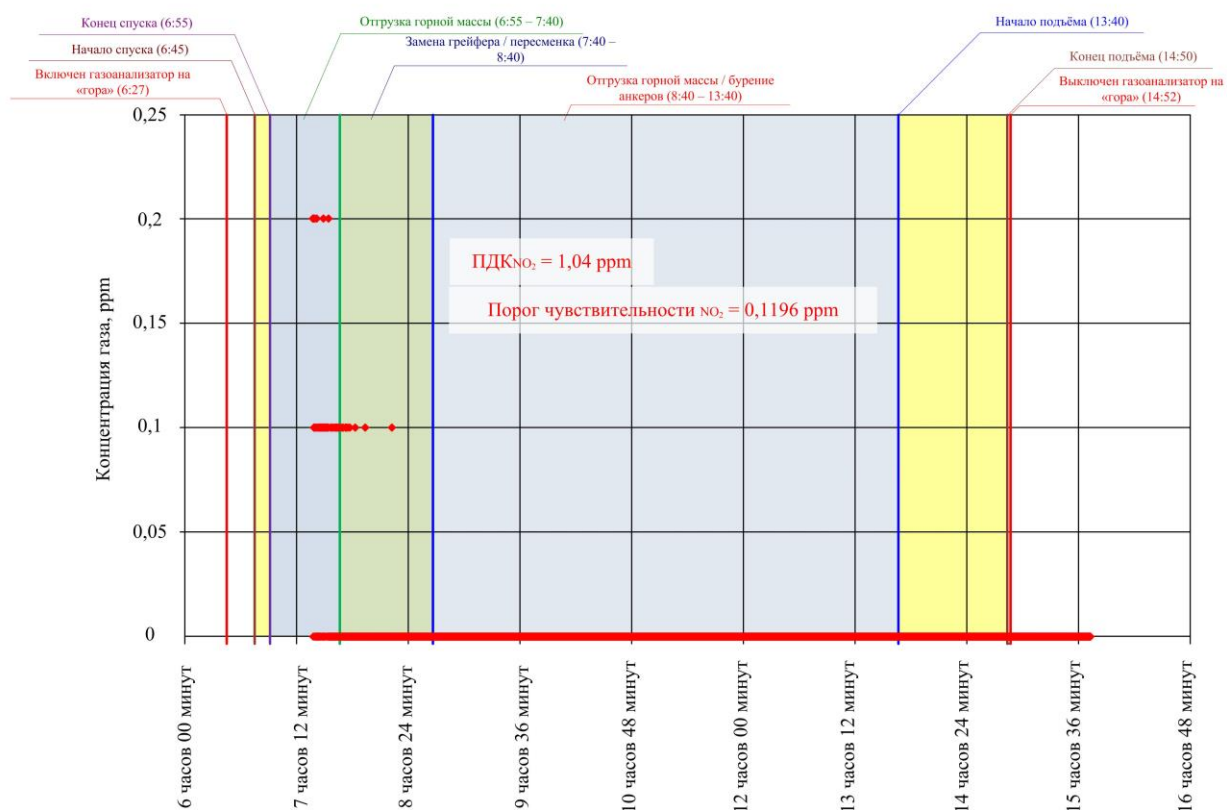


Рисунок 2.6 – Изменение концентрации диоксида азота (NO_2) по времени при различных технологических процессах, 25 декабря 2015 года

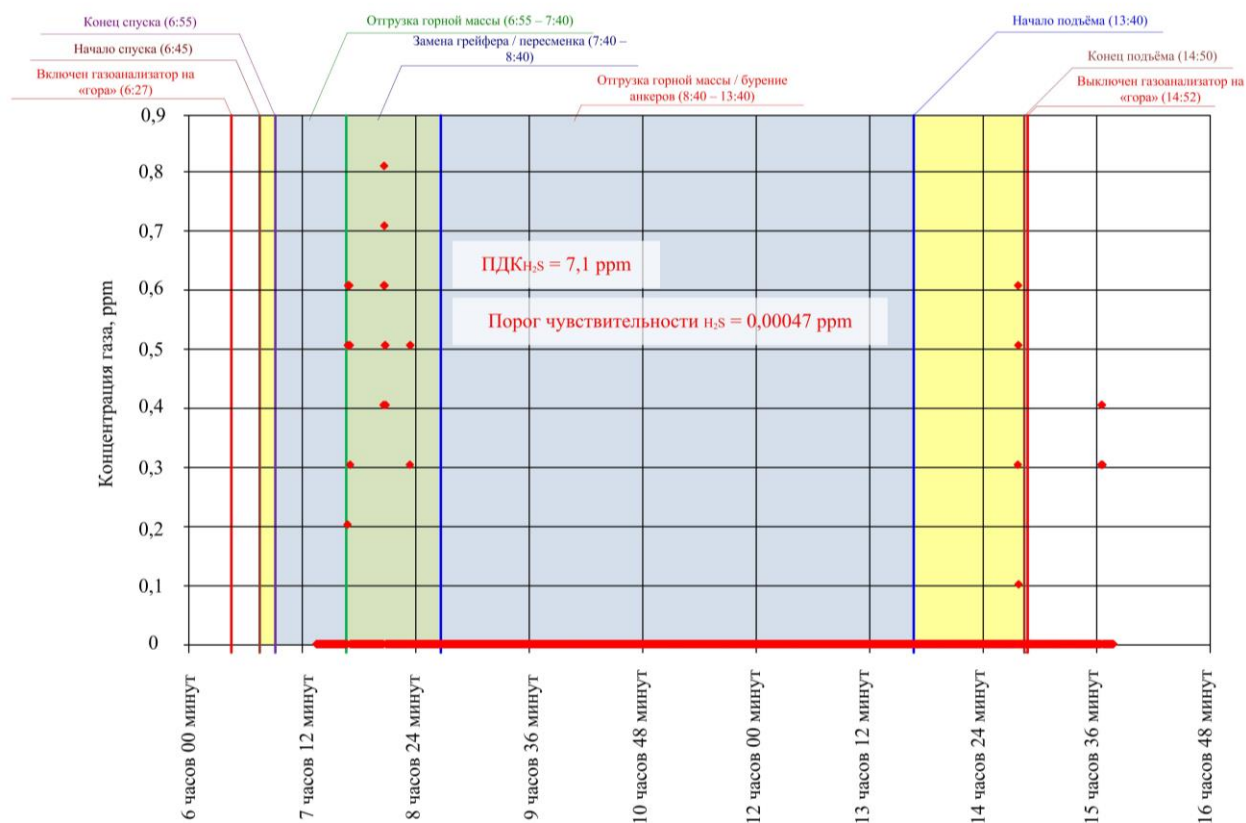


Рисунок 2.7 – Изменение концентрации сероводорода (H_2S) по времени при различных технологических процессах, 25 декабря 2015 года

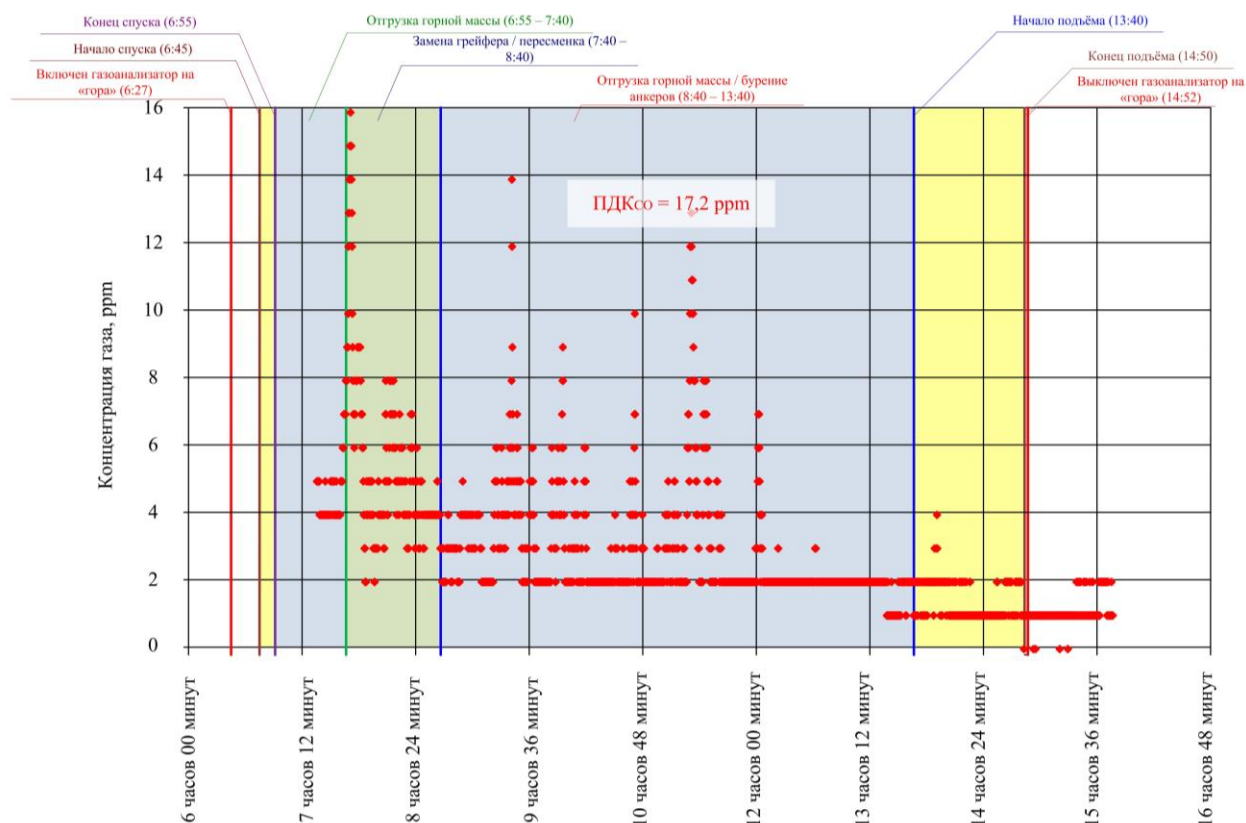


Рисунок 2.8 – Изменение концентрации угарного газа (СО) по времени при различных технологических процессах, 25 декабря 2015 года

Одним из определяющих факторов, влияющих на расчётную величину требуемого количества воздуха, является газовыделение от машин, работающих с применением двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Здесь расчёт ведётся по устаревшей норме воздухообмена на единицу мощности оборудования. В научной литературе не удалось найти обоснования выбора данного нормативного значения.

В зарубежных нормах наблюдается та же ситуация [353]. Нормативные значения величины количества воздуха на единицу мощности, принятые в других горнодобывающих странах, приведены в таблице 2.1, из которой видно, что в России принято самое высокое значение необходимого количества воздуха на единицу мощности машин с ДВС.

С ростом мощности применяемых машин с ДВС (например, Toro400D имеет номинальную мощность 160 кВт) существенно растёт расчётная величина необходимого количества воздуха. При этом совсем не учитываются

режимы работы машин с ДВС, применяемые катализаторы и устройства нейтрализации выхлопных газов [115].

Таблица 2.1 – Значения величины количества воздуха, необходимого для разбавления газов, образующихся в результате работы машин с ДВС [353]

Страна	Величина $Q_{\text{ДВС}}$ на единицу мощности машин с ДВС
Российская Федерация	0,1 м ³ /с на 1 кВт
Австралия	0,06 м ³ /с на 1 кВт
Канада	изменяется в пределах от 0,045 до 0,092 м ³ /с на 1 кВт
Чили	0,063 м ³ /с на 1 кВт
Китай	0,067 м ³ /с на 1 кВт
ЮАР	0,063 м ³ /с на 1 кВт (минимальное допустимое значение)
США	На основе данных MSHA – требуется обеспечение отдельных стандартов (Tier) по каждому типу двигателей [303] – изменяется в пределах от 0,01 до 0,139 м ³ /с на 1 кВт

Вопросам пылевыведения в горные выработки посвящено много научно-исследовательских работ как отечественных учёных Л.И. Барон [8], В.И. Дрёмов [42, 43], Б.Ф. Кирич [79], В.В. Кудряшев [134, 135], Г.А. Поздняков [180, 181], С.Б. Романченко [203], О.В. Скопинцева [216] и др., так и зарубежных. Интенсивность пылевыведения, как и размеры частиц пыли [87, 338], зависят от применяемого горного оборудования, режимов его работы, технологии ведения горных работ, способов транспортировки горной массы и др. Установлено, что снижение запылённости требует уменьшение скорости движения воздуха, а выделение вредных газов из массива требует её увеличения [82, 83]. Поэтому аэродинамические методы пылеподавления для повышения уровня взрывобезопасности не целесообразны. Вопросы снижения запылённости должны решаться технологиями пылеподавления и/или пылеулавливания. Поэтому при проектировании вентиляции систем шахт эти вопросы определяющего значения не имеют. Источники пыли имеют локальный характер и не требуют общесистемных методов борьбы с ними.

Вопросам тепловыведения в нашей стране посвящено много работ в разных направлениях. Основоположниками рудничной теплофизики являются такие учёные, как А.Н. Щербань [271-276], Ю.Д. Дядькин [45- 47], А.Ф. Воропаев [15], ими заложены основы проектирования вентиляции горных

предприятий с учётом температурного режима шахт и рудников. Вопросами тепловых режимов тоннелей и подземных сооружений занимается С.Г. Гендлер [25-27]. Также в работах ЛГИ под руководством Ю.В. Шувалова [267-269] были проведены исследования по оценке возможности применения выработанного пространства сланцевых шахт для обогрева воздуха. Данный способ обогрева воздуха в настоящее время активно применяется и является единственным на сланцевой шахте «Эстония». Большой и всесторонний анализ систем воздухоподготовки (кондиционирования и обогрева воздуха) проведён в работах Л.Ю. Левина [141-155]. Тепловым режимам в условиях ведения горных работ на Крайнем Севере посвящены работы А.С. Курилко [136-138]. Математическим моделированием тепловых режимов посвящены работы Ю.А. Хохлова [260-263]. Большое количество работ по тепловым режимам выполнено в Горном институте УрО РАН под руководством А.Е. Красноштейна и Б.П. Казакова [54-55, 57, 58, 129]. На новый уровень нашу страну вывела работа А.В. Зайцева [39, 49, 158], позволившая производить нестационарный расчёт тепловыделения, что также было реализовано в программном вычислительном комплексе «Аэросеть».

В отечественных отраслевых нормах установлены величины минимальной допустимой температуры (2°C) и максимальной температуры (26°C) независимо от его влажности. Ранее в Правилах безопасности максимальное значение допустимой температуры воздуха определялось с учётом влажности воздуха (таблица 2.2). Сегодня эти нормы потеряли своё значение, поскольку для всех отраслей параметры микроклимата определяются единым документом (СанПиН [284]), отклонение от санитарных норм регламентируются как факторы, повышающие класс условий труда (профессиональные риски) с соответствующим повышением страховых тарифов.

С другой стороны температурно-влажностный режим в определённых условиях влияет на аэрологическую безопасность и естественную тягу, что действующими методиками проектирования вентиляции не учитывается.

Таблица 2.2 – Соотношение минимальной скорости движения воздуха с допустимой температурой и влажностью

Минимальная скорость движения воздуха, $U_{з.мин}$ м/с	Допустимая температура ($^{\circ}\text{C}$) при относительной влажности, %		
	60 – 75	76 – 90	свыше 90
0,25	24	23	22
0,5	25	24	23
1,0	26	25	24
2,0	26	26	25

Источниками тепловыделения являются горный массив, технологические процессы (например, взрывные работы), горная техника (дизелевозы, ПДМ, конвейерный транспорт и др.), сопутствующие процессы (при закладке выработанных пространств специальными растворами), электрооборудование, люди и др.

Эмпирические формулы для расчёта величины тепловыделения от различных источников, полученные рядом исследователей, приведены в таблице 2.3 [49, 80, 81].

Таблица 2.3 – Зависимости для расчёта тепловыделения от различных источников

№	Вид зависимости		Источник тепловыделения
1	$T_{\text{пор.}} = k_{\tau} \cdot l \cdot P \cdot (t_{\text{пор.}} - t_{\text{ср}})$	(2.1)	Тепловыделение при охлаждении горных пород, (кДж/ч)
2	$T_{\text{вв}} = 0,8 \cdot q_{\text{вв}} \cdot G$	(2.2)	Тепловыделение при проведении взрывных работ, (кДж/ч)
3	$T_{\text{л.}} = q_{\text{ч.}} \cdot N$	(2.3)	Тепловыделение от людей, (кДж/ч)
4	$T_{\text{м.}} = W \cdot k_{\text{з}} \cdot k_{\text{з}} \cdot 3,6 \cdot 10^3$	(2.4)	Тепловыделение от машин, механизмов и осветительных приборов, (кДж/ч)
	$\frac{dQ}{dt} = \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) \cdot W$	(2.5)	
5	$T_{\text{ок.}} = q_0 \cdot U^{0,8} \cdot P \cdot l$	(2.6)	Тепловыделение в результате окисления горных пород, (кДж/ч)
6	$T_{\text{сж.}} = 9,81 \cdot Q \cdot \rho \cdot k_{\text{п}}$	(2.7)	Тепловыделение в результате сжатия или расширения воздуха
7	$T_{\text{влаги}} = \frac{r}{\Delta S} \cdot \frac{dm_{\text{в.}}}{dz} \cdot U$	(2.8)	Тепловыделение в результате фазовых переходов воды (конденсации и испарения влаги)
8	$T_{\text{т.з.}} = L \cdot \Psi \cdot \rho_{\text{з.м.}} \cdot V_{\text{з.к}}$	(2.9)	Тепловыделение в результате твердения закладки, Дж/ч

где k_{τ} – коэффициент нестационарного теплообмена, кДж/(м²·ч· $^{\circ}\text{C}$), принимаем равным $k_{\tau} = 0,712$; P – периметр горной выработки, м; S – площадь сечения горной выработки,

м^2 ; l – длина призабойной части (незакрепленной), м; $t_{\text{пород}}$ – температура неохлажденных горных пород, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ср}}$ – средняя температура воздуха в стволе, $^{\circ}\text{C}$; $q_{\text{ВВ}}$ – удельное тепловыделение при взрыве 1 кг ВВ, кДж/кг; G – количество взрывчатых веществ, расходуемое за один период взрывания, кг; $q_{\text{ч}}$ – тепловыделение от одного человека, кДж/ч; N – наибольшее число людей, занятых одновременно на подземных работах; W – суммарная мощность установок, кВт; k_3 – коэффициент перехода электроэнергии в тепловую энергию; η – коэффициент полезного действия; q_0 – тепловыделение в результате окисления пород, приведённое к скорости движения воздуха $U = 1$ м/с, кДж/м²·ч, $q_0 = 11,1 \div 14,8$ кДж/м²·ч; Q – объём воздуха, проходящего по выработке, м³/ч; ρ – плотность воздуха, кг/м³; $k_{\text{п}}$ – коэффициент перевода Вт в кДж/ч, $k_{\text{п}} = 3,6 \cdot 10^3$; k_3 – коэффициент загрузки; L – удельная массовая теплота твердения связующего (Дж/кг); ψ – массовая доля связующего в закладочном материале (ед. доли); $\rho_{\text{з.м.}}$ – плотность закладочного материала (кг/м³); $V_{\text{з.к.}}$ – объём закладываемой камеры (м³); r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; dm – масса выделившейся или поглощённой воды; U – скорость движения воздуха, м/с.

Общее тепловыделение в горные выработки рассчитывается как сумма тепловыделений из различных источников

$$T_{\text{общ}} = T_{\text{пор.}} + T_{\text{ВВ.}} + T_{\text{л.}} + T_{\text{м.}} + T_{\text{сж.}} + T_{\text{ок.}} + T_{\text{влаги}} + T_{\text{т.з.}} \quad (2.10)$$

Величина общего тепловыделения в горные выработки используется для расчёта необходимого количества воздуха (формула 2.38 раздела 2.3).

Как видно, в методике не учитывается время работы машин, проведения технологических операций (таких как взрывные работы). Не учитывается также место нахождения источников тепловыделения. Вопрос вызывает также получение величин коэффициента загрузки и средней температуры воздуха в горной выработке.

Исследования, проведённые при строительстве шахты «Глубокая» рудника «Скалистый», показали, что при проведении взрывных работ температура воздуха в момент взрыва увеличивается незначительно (рисунок 2.9), что ставит под сомнения формулу (2.2).

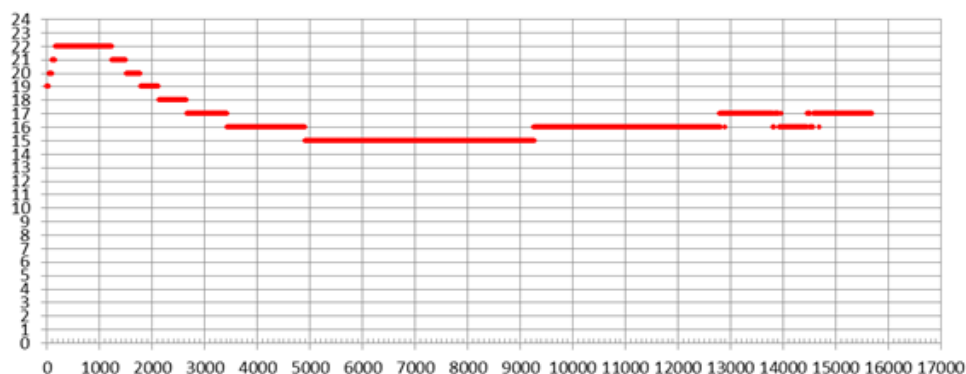


Рисунок 2.9 – График изменения температуры рудничной атмосферы в момент проведения взрывных работ

Тепловыделение в результате окисления не учитывает вид горных пород и время, за которое происходит сам процесс. Получается, что в методике берётся некоторая средняя величина максимально разового общего тепловыделения.

Из последних исследований по тепловыделению следует отметить работу А.В. Зайцева [49], посвященную разработке способов нормализации теплового режима в рудниках. В работе проведены исследования по тепловыделению в результате затвердевания закладки, работе машин с двигателями внутреннего сгорания, испарения и конденсации влаги в рудничной атмосфере. При этом разработанные алгоритмы и полученные зависимости используются в программном вычислительном комплексе «Аэросеть» в виде отдельного модуля. Данный модуль позволяет произвести расчёт температуры воздуха в горных выработках, однако не учтён нестационарный процесс теплообмена между массивом горных пород и воздухом для всех горных выработок.

Обособленно решаются вопросы оценки радиационной обстановки на горных предприятиях. Имеющийся нормативный документ (РД 8-016-91) прямо говорит о том, что «радиационная обстановка в шахте зависит главным образом от интенсивности её проветривания, содержания урана и тория в углях и вмещающих породах, и, наконец, от скорости выделения радона и торона в рудничную атмосферу» [162]. Там же написано «если в этих шахтах обеспечивается норматив по запылённости воздуха (10 мг/м^3), то средний

уровень суммарного воздействия радионуклидов на лёгкие (УВЛ) находится в пределах 0,5-0,7 от норматива для ограниченной части населения, и радиационная обстановка является достаточно благоприятной». Наличие пыли в количестве более 10 мг/м³ существенно повышает риск облучения.

Авторы [162] дают следующие предположения об особенностях радоновыделения в угольных шахтах:

- 1) радоновыделение происходит равномерно с поверхности;
- 2) чем интенсивнее выделяется метан, тем интенсивнее и радоновыделение;
- 3) при всасывающем способе проветривания ожидаются более высокие дебиты радона;
- 4) там, где происходит транспортирование горной массы, радоновыделение более интенсивное, чем в воздухоподающих выработках.

Следовательно, радоновыделение существенно зависит от применяемых способов и схем проветривания. Сюда следует отнести проблемы с образованием скоплений радиоактивных эманаций в нижней части горных выработок, в кутках и нишах.

В общем случае при проветривании горных предприятий необходимо учитывать различные по своим свойствам и составу вещества. Они имеют различные физические и химические свойства (например, только по размеру частиц отличаются в 10^{16} раз) и в разных количествах и сочетаниях могут находиться в рудничной атмосфере.

При этом их концентрация, превышающая ПДК, негативно влияет на человека и при определённых условиях может взрываться и самовоспламеняться, приводя к крупным авариям.

Анализ показывает, что сегодня существует большое количество методик, основная часть которых основана на эмпирических зависимостях, полученных опытным путём для конкретных горно-геологических и технологических условий.

Применение данных методик для прогноза и расчёта в других условиях ведения горных работ дают низкую достоверность получаемых результатов по сравнению с фактическим выделением вредных и опасных примесей.

Следует отметить отсутствие единых методик и сложность их получения опытным путём.

Единственный способ, позволяющий учесть все вредные и опасные примеси в рудничной атмосфере в любых сочетаниях с учётом быстроменяющихся условий ведения горных работ, является математическое моделирование аэрогазотермодинамических процессов.

2.3. Расчёт необходимого для проветривания количества воздуха по определяющим факторам

2.3.1. Порядок расчёта

Расход воздуха, необходимого для проветривания, рассчитывается для мест с явно выраженными источниками, загрязняющими рудничную атмосферу. Как правило, расчёт ведут по основным определяющим укрупнённым факторам:

- 1) количество воздуха, необходимого для дыхания людей;
- 2) по выделению газа из массива добываемого полезного ископаемого и вмещающих пород (как правило, метана CH_4 и углекислого газа CO_2), из шахтных вод и из отбитой горной массы;
- 3) по скорости движения воздуха, а именно средней минимальной скорости воздуха в горной выработке, по минимальной скорости воздуха в призабойном пространстве выработки с учётом температуры и по максимально разрешенной скорости движения воздуха;
- 4) по газам, образующимся при ведении технологических процессов и работе оборудования, а именно взрывных работах, сварочных работах,

при работе машин с двигателями внутреннего сгорания, зарядные устройства;

- 5) по избыткам тепловыделения (отдельные требования по тремовлажностному режиму предъявляются к режимам проветривания шахт в условиях многолетних мерзлых пород) и т.п.

При дальнейших расчётах используют максимальную величину расхода воздуха, получившуюся из расчётов по факторам.

В различных методиках подсчёта необходимого количества воздуха используют различные формулы для одного и того же фактора. Наибольшую неопределённость представляет собой расчёт количества воздуха, необходимого для разбавления газов образующихся после проведения взрывных работ.

Принято считать, что расчёт количества воздуха является основным этапом проектирования вентиляции, однако он является лишь частью необходимых вычислений. Ошибки в расчёте необходимого и достаточного количества воздуха в конечном итоге сказываются на здоровье и безопасности труда.

Подаваемый в шахту воздух предназначен для создания здоровых и безопасных условий труда рабочих путём обеспечения содержания в воздухе необходимого количества кислорода, минимального (не выше допустимого) количества ядовитых, взрывчатых газов и пыли, радиоактивных элементов, необходимой температуры воздуха и влажности. Количество подаваемого в шахту воздуха должно быть достаточным, чтобы поддерживать концентрации вышеперечисленных веществ, температуры и влажности в рудничной атмосфере в соответствующих пределах, устанавливаемых санитарно-гигиеническими нормами и требованиями промышленной безопасности.

Из сказанного следует, что метод расчёта количества воздуха необходимо базировать на законах тепломассопереноса в горных выработках, т.е. нужно использовать динамический диффузионный метод. Применяемые методы

расчёта количества воздуха являются в основном статическими без учёта коэффициента диффузии газов в воздухе.

2.3.2. Расчёт необходимого и достаточного количества воздуха для дыхания горнорабочих

Расчёт количества воздуха, необходимого для дыхания людей, производится для всех подземных горных предприятий, учитывается всеми Правилами и методиками по проектированию вентиляции. Требуемая величина определяется по общей формуле

$$Q_{\text{л}} = q \cdot N \quad (2.11)$$

где q – количество воздуха, которое необходимо подать к рабочему месту человека, измеряется в м³/мин; N – количество работающих людей.

В России норма воздуха на одного человека составляет 6 м³/мин [250], а в других странах требуемое количество воздуха существенно ниже (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Количество чистого воздуха на одного работающего разных стран мира[34]

№	Страна	Расчётные нормы воздуха на человека
1	Соединённые Штаты Америки для не газовых шахт	$q = 100-150$ куб. фут/мин (2,83-4,25 м ³ /мин)
2	Соединённые Штаты Америки для газовых шахт	$q = 200$ куб. фут/мин (5,7 м ³ /мин)
3	Англия для не газовых шахт	$q = 20$ куб. фут/мин (0,57 м ³ /мин),
4	Германии	$q = 3$ м ³ /мин
5	Австралии для угольных шахт	$q = 100$ куб. фут/мин (2,83 м ³ /мин)
6	Австралии для металлических рудников	$q = 70$ куб. фут/мин (2 м ³ /мин)
7	Чехословакии	от 6 до 10 м ³ /мин в зависимости от газообильности

По ряду отечественных методик в формулу (2.11) добавляются коэффициенты, учитывающие утечки воздуха через выработанное пространство ($k_{\text{ут.в.}}$) [207, 228]; коэффициента запаса ($k_{\text{зап.}}$) [183]; коэффициент учитывающий естественную тягу ($k_{\text{е.}}$) [183]. Их учёт приводит к увеличению требуемого количества воздуха на 80 %.

Проведённые исследования [90] показали, что в зависимости от выполняемой работы, человеку для дыхания требуется от 0,1 до 0,3 м³/мин. Что в 20 раз ниже установленной Правилами величины.

2.3.3. Анализ методик расчёта необходимого и достаточного количества воздуха для разбавления вредных и опасных газов, образующихся при ведении взрывных работ

Расчёт количества воздуха, необходимого для разбавления газов, образующихся при ведении взрывных работ может производиться по целому ряду эмпирических методик (таблица 2.5). Время проветривания забоев после взрывных работ не должно превышать 30 минут, что регламентировано Правилами безопасности при строительстве подземных сооружений [184]. Требованием Правил безопасности [184, 250], помимо соблюдения минимального времени проветривания, является снижение концентрации всех вредных и опасных газов ниже уровня ПДК.

Таблица 2.5 – Зависимости для определения количества воздуха необходимого для разбавления газов, образующихся после проведения взрывных работ

№	Автор	Вид зависимости	
1	Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт [207]	$Q_{BB} = \frac{2,25 \cdot S}{T} \cdot \sqrt[3]{\frac{A \cdot G_{BB} \cdot l^2 \cdot k_{обв.}}{S \cdot k_{ут.}}}$	(2.12)
2	формула Воронова П.И. и Ольховского М.М.	$Q_{BB} = \frac{5 \cdot A \cdot G_{BB} \cdot k}{T}$	(2.13)
3	из Справочника по рудничной вентиляции [230]	$Q_{BB} = \frac{100 \cdot A \cdot G_{BB} \cdot k_з}{c_{ПДК} \cdot T}$	(2.14)
4	по формуле Воронина В.Н. [14]	$Q_{BB} = \frac{2,3}{T} \sqrt[3]{A \cdot S^2 \cdot l^2 \cdot G_{BB}}$	(2.15)
5	по формуле Воронина В.Н. с поправкой ВНИИОМШСа на обводнённость [205]	$Q_{BB} = \frac{2,25}{T} \sqrt[3]{\frac{A \cdot S^2 \cdot l^2 \cdot G_{BB} \cdot k_в}{k_{ут.}^2}}$	(2.16)
6	по формуле Мостепанова Ю.Б. [205]	$Q_{BB} = \frac{0,258 \cdot V}{T} (2,38 \cdot \lg A + 1)$	(2.17)
7	по формуле Кирина Б.Ф. [80]	$Q_{BB} = \frac{0,92}{T} \sqrt[3]{\frac{A \cdot S^2 \cdot l^2 \cdot k_{капж}}{\alpha \cdot k_{ут.}^2}}$	(2.18)
8	по формуле Скочинского А.А. [218]	$Q_{BB} = \frac{A \cdot G}{1000} \cdot \frac{100}{c_{ПДК}} \cdot \frac{k}{T}$	(2.19)

9	по формуле Воронина В.Н. (для стволов при их проходке) [205]	$Q_{\text{ВВ}} = \frac{7,8}{T} \cdot \sqrt[3]{\frac{k_{\text{в.}} \cdot A}{k_{\text{ут.тр.}}^2}} (S \cdot l)^2$	(2.20)
10	по формуле Кирина Б.Ф., Ушакова К.З. (для стволов при их проходке) [81]	$Q_{\text{ВВ}} = \frac{2,25 \cdot S}{T} \cdot \sqrt[3]{\frac{k_{\text{в.}} \cdot A \cdot G \cdot l^2}{S \cdot k_{\text{ут.тр.}}^2}}$	(2.21)
11	по формуле Мустеля П.И. (для стволов при их проходке) [127]	$Q_{\text{ВВ}} = \frac{140 \cdot d_{\text{ст.}} \cdot \sqrt{A}}{T}$	(2.22)
12	по формуле ВНИИОМШС (для стволов при их проходке) [127]	$Q_{\text{ВВ}} = \frac{2,3}{T} \cdot \sqrt[3]{\frac{A \cdot V_3^2 \cdot G \cdot k_{\text{обв.}}}{k_{\text{ут.тр.}}^2}}$	(2.23)
13	по формуле Руководства (для стволов при их проходке) [207]	$Q_{\text{ВВ}} = \frac{2,25 \cdot S}{T} \cdot \sqrt[3]{\frac{A \cdot l_{\text{п}}^2 \cdot G \cdot k_{\text{обв.}}}{S \cdot k_{\text{ут.тр.}}^2}}$	(2.24)

Для анализа методик, применяемых для расчёта необходимого количества воздуха по рассматриваемому фактору, были произведены натурные измерения и расчёты по зависимостям (2.12-2.24) [106, 111].

Для исследований был выбран объект горного строительства вентиляционный ствол ВС-10 и скиповой ствол СКС-1 шахты «Глубокая» рудника «Скалистый», г. Норильск.

Исходные данные были приняты по следующим фактическим значениям: количество взрывчатых веществ (аммонита 6ЖВ), расходуемое за один период взрывания A , кг, по данным технологии ведения строительных работ, равно $A = 380$ кг; газовость взрывчатых веществ $G_{\text{ВВ}}$, л, в соответствии с Правилами безопасности при строительстве подземных сооружений [184], $G_{\text{ВВ}} = 40$ л/кг, соответственно $G_{\text{ВВ}} = 0,04 \text{ м}^3/\text{кг}$; сечение ствола в свету, S м^2 , по данным технологии ведения строительных работ сечение ствола в свету $S = 63,585 \text{ м}^2$; диаметр ствола $d_{\text{ст.}}$, м. $d_{\text{ст.}} = 9$ м; длина проветриваемой выработки (ствола) l , м. Конечная длина ствола $l = 2040$ м. Расчёт производится с учётом максимальной глубины ведения горных работ; объём проветриваемой выработки V , м^3 . При максимальной длине ствола $V = l \cdot S = 2040 \cdot 63,585 = 129713,4 \text{ м}^3$; объём загазирования в момент взрыва, принимается равным объёму ствола между забоем и предохранительным полком (где $l_3 = 50$ м расстояние от забоя до верхнего этажа полка) V_3 , м^3 . $V_3 = S \cdot l_3 = 63,585 \cdot 50 = 3179,25 \text{ м}^3$; коэффициент аэродинамического трения ствола α , $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$. Принимается равным $\alpha = 0,0053 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; время проветривания после взрывных работ T , мин. $T = 30$ минут; максимальная допустимая концентрация газов ВВ перед допуском людей $c_{\text{пдк}}$, %. Для условий окиси углерода $c_{\text{пдк}} = 0,0017$ %; коэффициент, учитывающий обводнённость выработки $k_{\text{обв.}}$, принимается в соответствии с таблицей 8 Руководства [207] при водопитоке – от $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $15 \text{ м}^3/\text{ч}$ и при

капее в виде дождя коэффициент равен $k_{обв.} = 0,6$; коэффициент утечек воздуха $k_{ут.}$ для гибкого трубопровода принимается равным $k_{ут.} = 7,15$ (при длине трубопровода $l_{тр.} = 2000$ м) [207]. Для формулы (2.20) принимается равным в соответствии с условием пособия [205], $k_{ут.} = 1,9$; в формуле (2.19) коэффициент запаса k , подаваемого в строящийся ствол воздуха, принимается равным $k = 1,5$; в формуле (2.14) коэффициент запаса k_3 , при отсутствии аэродинамической связи с поверхностью $k_3 = 1,35$; коэффициент турбулентной диффузии k_t принимается равным $k_t = 0,247$, (при диаметре трубопровода $d_{тр.} = 1,8$ м, $d_{п.} = 2d_{тр.} = 3,6$ м и длине одного звена вентиляционного трубопровода $l_{з.тр.} = 10$ м) [207]; коэффициент обводнённости выработки $k_{в.}$, равный для выработок, проводимых во влажных породах, $k_{в.} = 0,3$; коэффициент $k_{капееж}$, учитывающий влияние капеежа в соответствии с таблицей 11 [80] $k_{капееж} = 0,3$; длина призабойной части $l_{п.}$ м. Для выработок большой протяженности в формулах 2.12 и 2.24 вместо $l_{п.}$ подставляется l_{max} :

$$l_{max} = 12,5 \cdot \frac{A \cdot G_{BB} \cdot k_t}{S \cdot k_{ут.}^2} \quad (2.25)$$

Результаты расчёта сведены в общий график (рисунок 2.10).

Следует обратить внимание на большой разброс в полученных значениях определяемого количества воздуха: более чем в 600 раз. Все зависимости – эмпирические, получены опытным путём для определённых диапазонов используемых параметров. При этом физического смысла они не имеют, поскольку не отображают взаимного влияния рассматриваемых факторов.

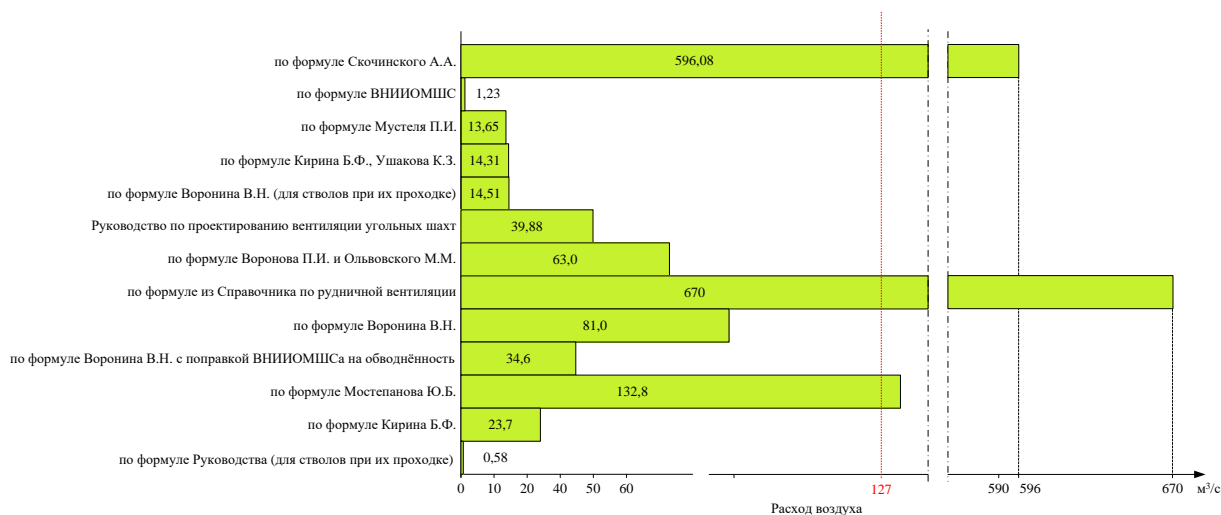


Рисунок 2.10 – Сводный график расчётных значений необходимого количества воздуха для разбавления вредных и опасных газов, образующихся при ведении взрывных работ

Так, в зависимостях (2.12, 2.16, 2.18, 2.20, 2.21, 2.23, 2.24) учитывается коэффициент утечек воздуха по воздуховоду. При этом в формулах коэффициент находится в знаменателе, т.е. чем меньше утечки, тем больше воздуха необходимо подать, и наоборот, чем больше утечки, тем меньше воздуха необходимо (рисунок 2.12), что не логично. При дальнейшем расчёте количество воздуха, которое должно быть расчётным для выбора вентиляторной установки, снова учитывается коэффициент утечек.

Для анализа применяемых методик были проведены натурные измерения количественного и качественного состава газов, образующихся в результате проведения взрывных работ в строящихся стволах ВС-10 и СКС-1 шахты «Глубокая» рудника «Скалистый», г. Норильск, и проведён сравнительный анализ с ранее полученными расчётными значениями (рисунок 2.11).

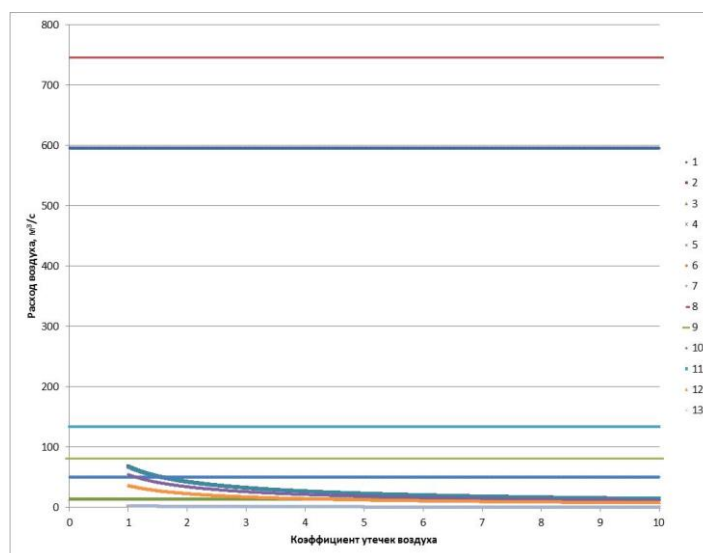


Рисунок 2.11 – Графики зависимости величины количества воздуха от значения коэффициента утечек

Измерения производились переносными газоанализаторами МХ6, установленными на 5-м и 7-м этажах полка (рисунок 2.12). Запись показаний датчиков производилась через каждые 10 с. Измерялись концентрации газов диоксида серы SO_2 , диоксида азота NO_2 , сероводорода H_2S , метана CH_4 , углекислого газа CO_2 и угарного газа CO , а также измерялись давление и температура.

Для установления влияния типа ВВ исследования производились с аммонитом 6ЖВ и Нитронит-П в тех же условиях. В момент проведения взрывных работ вентиляция прекращалась. После взрыва проветривание возобновлялось в течение 1-2 минут по команде горного мастера.

В первом эксперименте, проведённом в июне 2014 г., при взрывании 380 кг ВВ, аммонит 6ЖВ, зафиксированы выделения следующих газов:

- оксида углерода (CO) с превышением ПДК в момент взрыва в 55 раз (рисунок 2.13);
- метана (CH₄) в незначительных количествах (рисунок 2.14);
- сероводорода (H₂S) (рисунок 2.15);
- диоксида азота (NO₂) (рисунок 2.16);
- оксида серы (SO₂) (рисунок 2.17);
- диоксида углерода (CO₂) (рисунок 2.18).

На рисунках 2.13 – 2.18 красными линиями обозначены максимальные значения измеренных концентраций и ПДК.

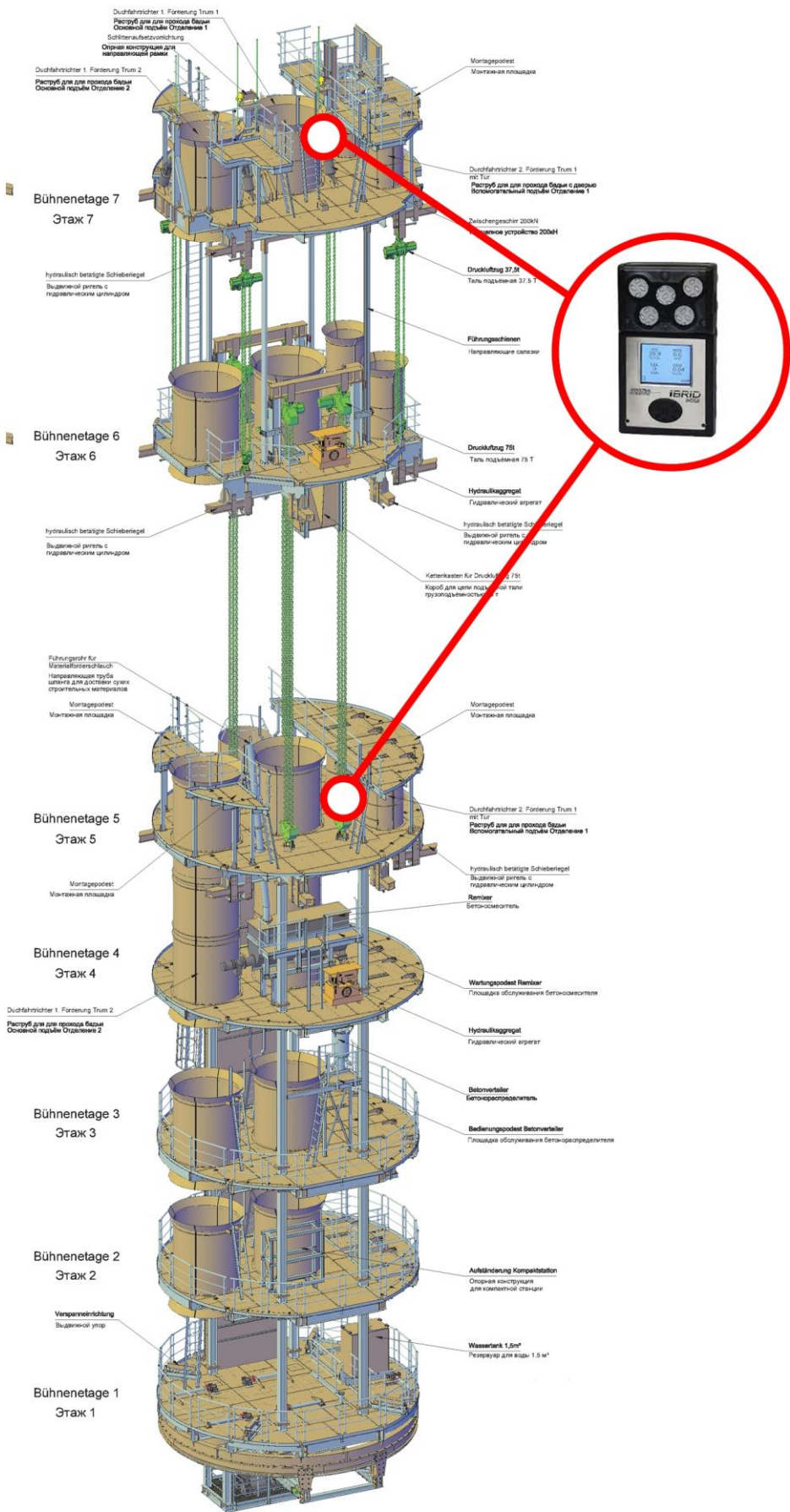


Рисунок 2.12 – Места установки газоанализаторов на полке

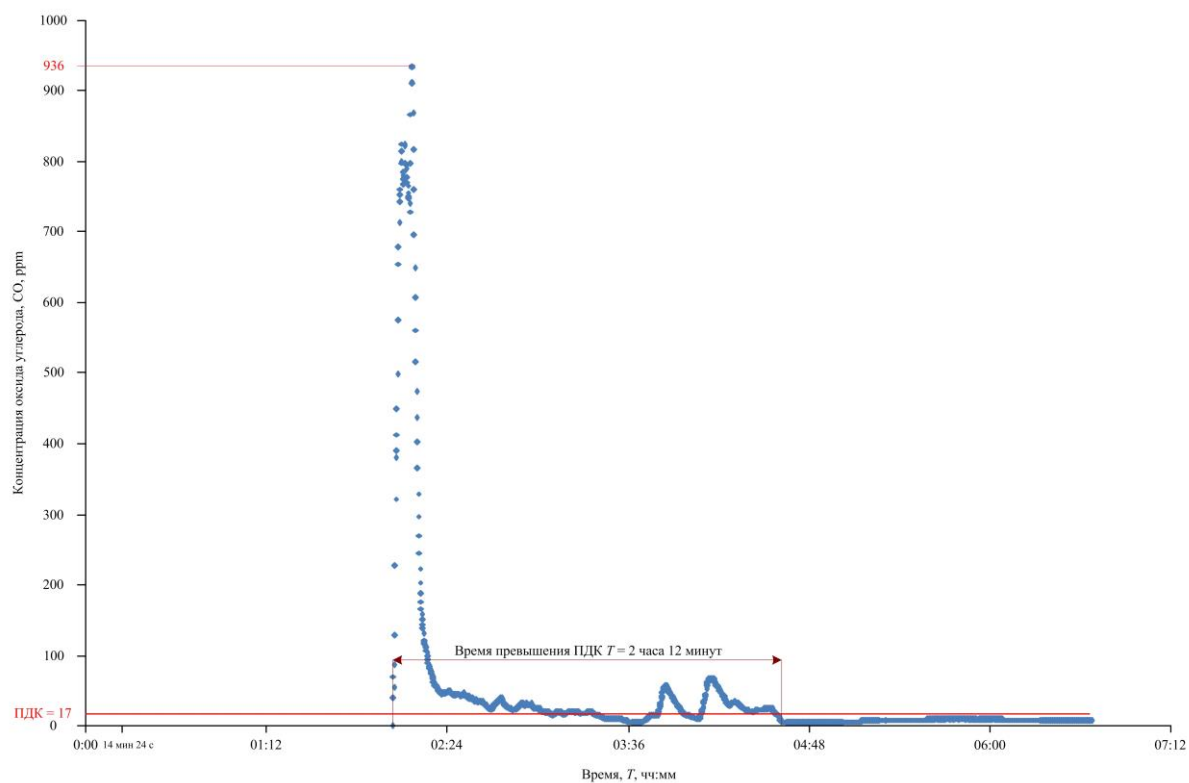


Рисунок 2.13 – Результаты натурных измерений концентрации оксида углерода (CO) в момент взрыва и после проведения взрывных работ

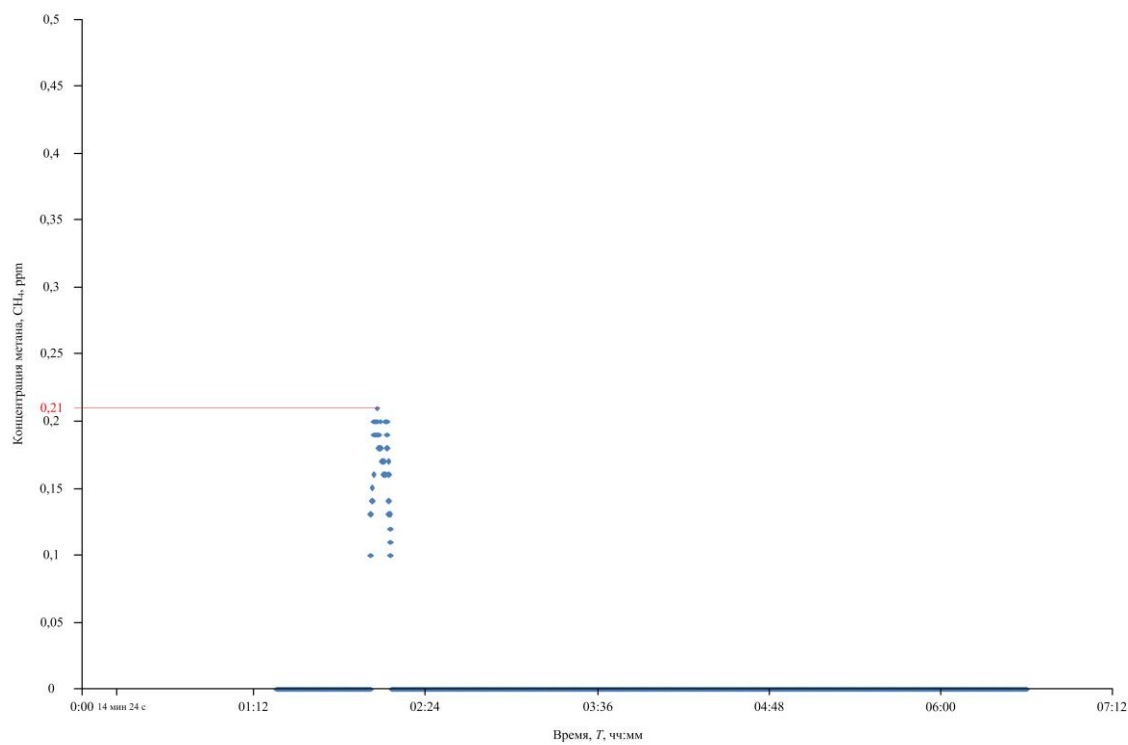


Рисунок 2.14 – Результаты натурных измерений концентрации метана (CH_4) в момент взрыва и после проведения взрывных работ

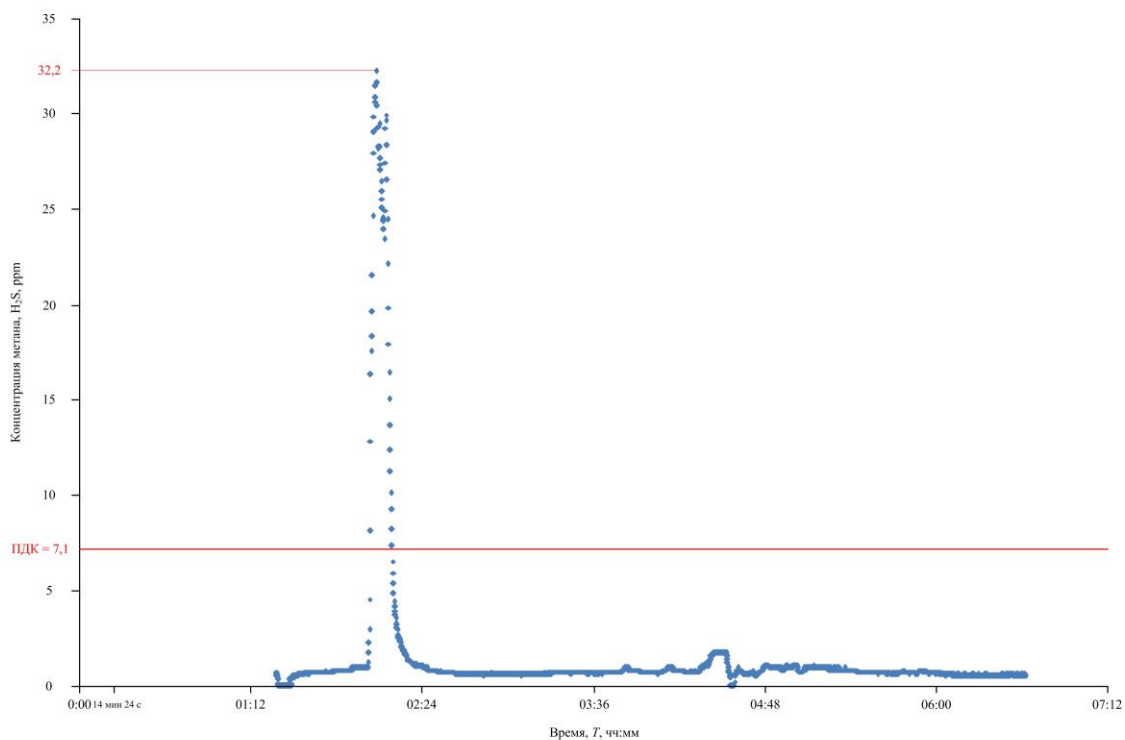


Рисунок 2.15 – Результаты натурных измерений концентрации сероводорода (H_2S) в момент взрыва и после проведения взрывных работ

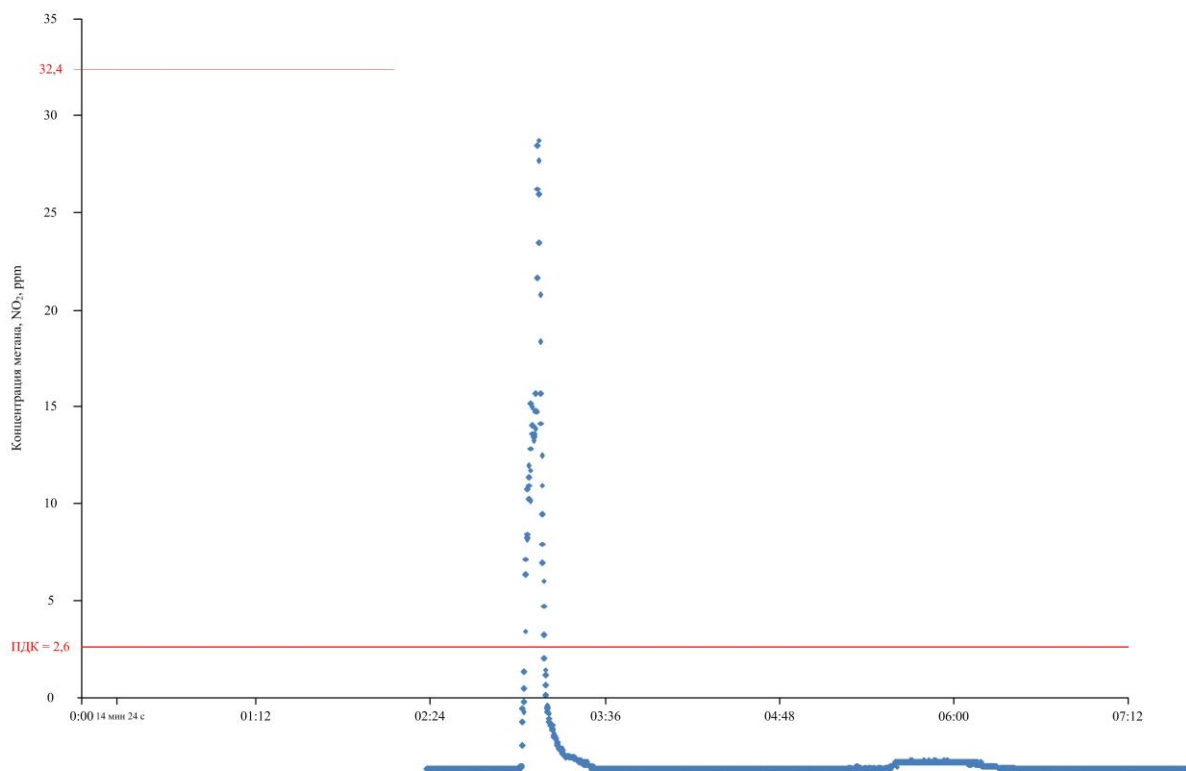


Рисунок 2.16 – Результаты натурных измерений концентрации диоксида азота (NO_2) в момент взрыва и после проведения взрывных работ

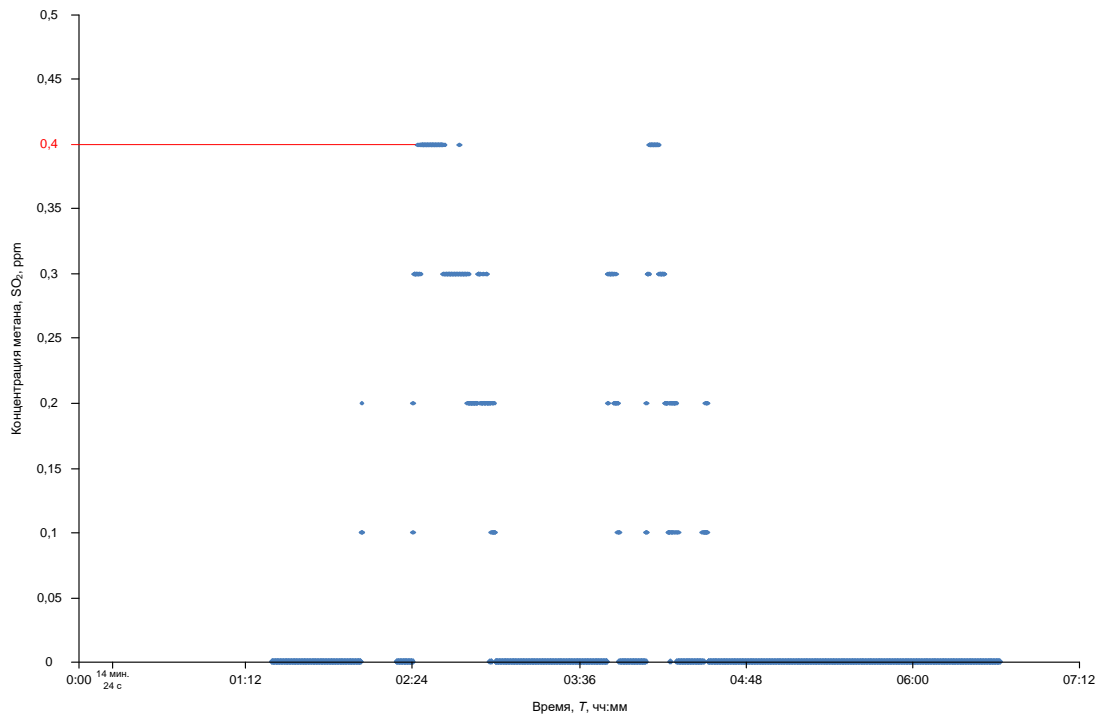


Рисунок 2.17 – Результаты натурных измерений концентрации диоксида серы (SO_2) в момент взрыва и после проведения взрывных работ

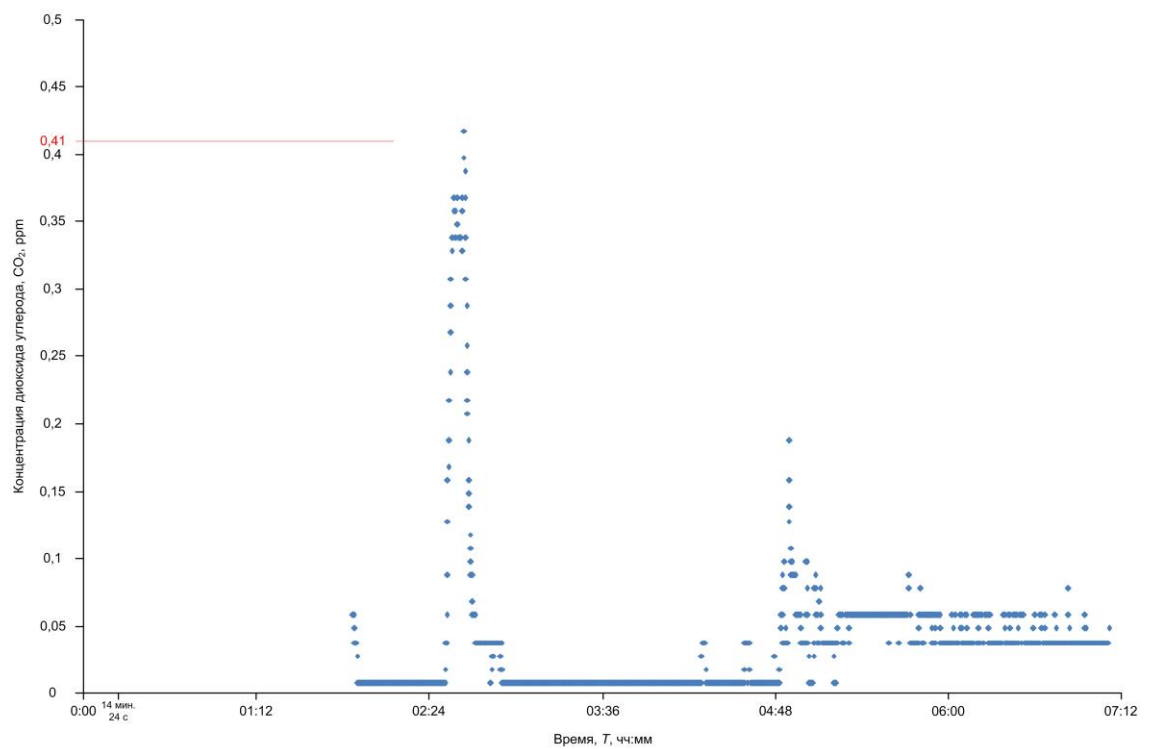


Рисунок 2.18 – Результаты натурных измерений концентрации диоксида углерода (CO_2) в момент взрыва и после проведения взрывных работ

Из представленных данных следует, что превышение ПДК оксида углерода в 55 раз, сероводорода – в 4,5 раза, диоксида азота – в 12,5 раз наблюдается сразу после взрывных работ. Метан, углекислый газ и диоксид серы присутствуют в рудничной атмосфере сразу после проведения взрывных работ, но их значения не превышают установленных норм ПДК. Концентрация сероводорода и диоксида азота снижается в течение 15 минут до уровня ПДК. Снижение концентрации СО до ПДК происходит за 2 часа 12 минут. При этом необходимо отметить, что газоанализатор производит измерения в одной точке (месте установки), и возможно наличие застойных зон. При проведении эксперимента было сделано допущение, что газы, образованные сразу после проведения взрывных работ, равномерно занимают объём. Однако эксперимент показывает обратное, т.е. имеются скопления газа – «облако» с более высокой концентрацией.

При пересчёте из процентов по объёму в мг/м^3 можно использовать формулу

$$C_{\text{в.}} = \left(\frac{C_{\text{об.}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{M \cdot 1000}{22,4} \right) \cdot 1000 = 446 \cdot M \cdot C_{\text{об.}}. \quad (2.26)$$

Тогда в единице объёма (или, что то же, в 1 м^3 рудничной атмосферы) после проведения взрывных работ в рудничной атмосфере содержится:

- оксид углерода СО в количестве $c_{\text{СО}} = 1168,88 \text{ мг/м}^3$,
- диоксид азота NO_2 в количестве $c_{\text{NO}_2} = 66,47 \text{ мг/м}^3$,
- оксида серы SO_2 в количестве $c_{\text{SO}_2} = 1,064 \text{ мг/м}^3$,
- сероводород H_2S в количестве $c_{\text{H}_2\text{S}} = 48,83 \text{ мг/м}^3$.

В соответствии с Правилами безопасности при строительстве подземных сооружений [184] «при проверке степени разжижения вредных продуктов взрыва следует принимать: 1 л окислов азота эквивалентными 6,5 л окиси углерода, 1 л сернистого газа – 4,5 л окиси углерода, 1 л сероводорода – 2,4 л окиси углерода».

С учётом пересчета на условную окись углерода концентрация после взрывных работ составит $c_{\text{СО}} = 1168,88 + 4,5 \cdot 1,064 + 6,5 \cdot 66,47 + 2,4 \cdot 48,83 =$

1722,915 мг/м³. Тогда для разбавления выделившихся вредных газов от взрывных работ в единице объёма понадобится

$$V_1 = \frac{c_1 \cdot V_2 - c^{\text{ПДК}} \cdot V_2}{c - c_2}, \text{ м}^3, \quad (2.27)$$

где $c^{\text{ПДК}}$ – предельно допустимая концентрация, %; c_1 – концентрация вредных газов после взрывных работ, %, $c_1 = 0,13758\%$; c_2 – концентрация вредных газов в начальный момент времени (или в поступающей струе), %, $c_2 = 0\%$; V_1 и V_2 – определяемый и единичный объём смеси воздуха с вредными газами, м³.

В итоге получим

$$V_1 = \frac{0,1482 \cdot 1 - 0,0017 \cdot 1}{0,0017 - 0} = 104,6, \text{ м}^3.$$

То есть для мгновенного разбавления (в течение 1 с) выделившегося газа в единичном объёме загазированной рудничной атмосферы требуется 104,6 м³ чистого воздуха. С учётом требований Правил безопасности разбавление газов после взрывных работ должно осуществляться в течение $\tau = 30$ мин (1800 с). Условно объём загазированной рудничной атмосферы принимается равным объёму пространства от забоя до верхнего этажа полка $V_3 = S \cdot L = 63,585 \cdot 50 = 3179,25$ м³, т.е. для мгновенного разбавления загазированной части забоя потребуется $V' = V_1 \cdot V_3 = 3179,25 \cdot 104,6 = 332549,55$ м³ чистого воздуха. Тогда необходимое количество воздуха для разбавления выделившихся после взрывных работ газов до ПДК можно будет рассчитать по формуле

$$Q_{\text{ВВ}}^{\text{факт}} = \frac{V'}{\tau}, \quad (2.28)$$

или

$$Q_{\text{ВВ}}^{\text{факт}} = \frac{332549,55}{1800} = 184,75 \text{ м}^3/\text{с}.$$

При включении вентиляторной установки с производительностью 26 м³/с снижение концентрации оксида углерода (СО) до значений ПДК происходит за 2 часа 27 минут. Как видно из расчётов, ни одна из формул (2.12 – 2.24) не даёт даже приближённый результат.

На следующем этапе были проведены исследования с применением другого ВВ – нитронит-П. При этом из-за разных энергетических характеристик нитронит-П применяется в количестве 644 кг, что 1,7 раз больше количества ранее применяемого аммонита 6ЖВ.

Результаты измерений концентрации оксида углерода (СО) приведены на рисунке 2.19. При этом для определения влияния места установки газоанализатора на максимальную величину оксида углерода (СО) использовались два датчика, размещённых на пятом и седьмом этажах полка.

Первый прибор расположен на 7-м этаже полка дальше от забоя на 8 м. Как видно из результатов измерения, максимальная концентрация оксида углерода по длине ствола распределяется неравномерно. На 5-м этаже максимальная концентрация оксида углерода в три раза выше, чем на 7-м этаже полка.

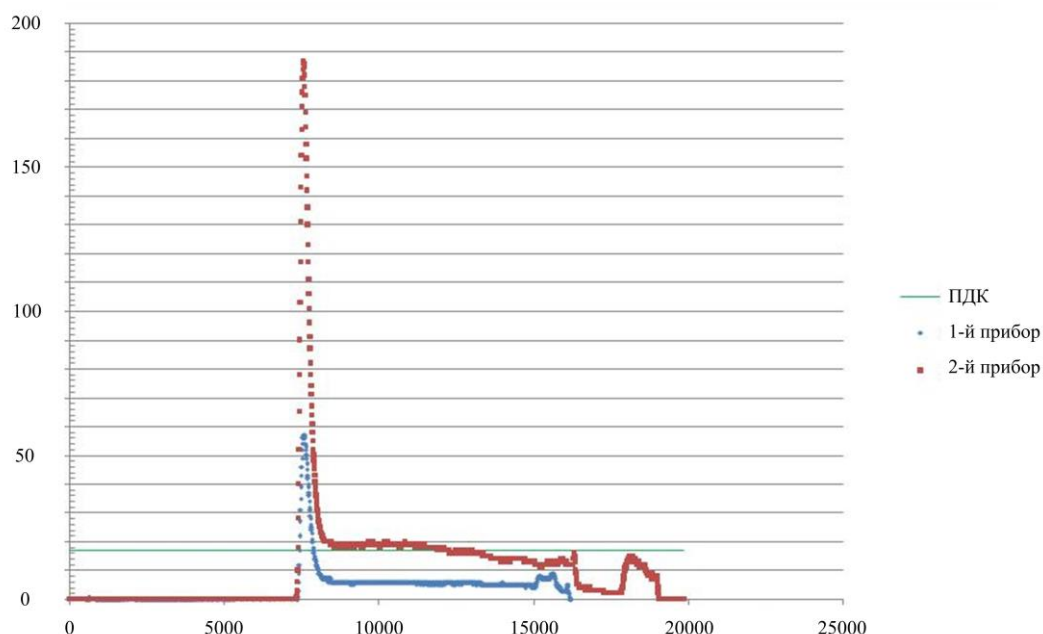


Рисунок 2.19 – Натурные измерения концентрации оксида углерода (СО) в момент взрыва и после проведения взрывных работ при применении ВВ нитронит-П

Сравнив данные показаний максимальной концентрации оксида углерода при использовании ВВ типа аммонит 6ЖВ (рисунок 2.14) и аналогичной величины при использовании ВВ типа нитронит-П (рисунок 2.20), можно

сделать вывод, что при использовании второго типа ВВ оксида углерода выделяется меньше в 5 раз.

Подводя итоги можно сказать:

1. Ни одна из существующих эмпирических формул для определения необходимого количества воздуха для проветривания после взрывных работ не позволяет сделать правильный расчёт.
2. Формулы не учитывают свойства горных пород, грунтовых вод и газов, содержащихся в них.
3. Формулы не учитывают тип ВВ.
4. В ряде формул учёт коэффициент утечек воздуха приводит к получению неправильного значения величины количества воздуха.
5. Коэффициент утечек воздуха по длине воздуховода по ряду методик требуется учитывать дважды, что может приводить к существенному завышению расхода воздуха.
6. Формулы не учитывают параметров рудничной атмосферы в момент проведения взрывных работ.
7. Определение необходимого количества воздуха для разбавления газов, образующихся после проведения взрывных работ, в настоящее время возможно только путём получения фактических значений при натурных измерениях.

Существенен и тот факт, что при использовании в расчёте количества воздуха по газам от взрывных работ, не учитывается временной фактор. Взрывные работы производятся по циклограмме ведения горных работ, и подавать рассчитанное по ВВ количество воздуха постоянно экономически нецелесообразно, при разработке месторождений полезных ископаемых, склонных к самовозгоранию, может быть опасно.

2.3.4. Анализ методик расчёта необходимого и достаточного количества воздуха для разбавления вредных и опасных газов, выделяющихся из горного массива

При ведении горных работ из разрабатываемого массива и вмещающих пород при их подработке и надработке возможно выделение следующих газов:

- метан (CH_4) и другие углеводороды;
- углекислый газ (CO_2);
- сероводород (H_2S);
- диоксид серы (SO_2);
- азот (N_2);
- радиоактивные элементы.

Расчёт расхода воздуха для разжижения выделяющихся из разрабатываемых пород газов до безопасной концентрации $c_{\text{ПДК}}$, прописанной в Правилах безопасности, основан на знании величины абсолютного газовыделения в единицу времени (минуту, час или секунду). В общем случае расчёт производится по формуле

$$Q_{\text{газ}} = \frac{100 \cdot I}{c_{\text{ПДК}} - c_0}, \quad (2.29)$$

где I – абсолютное газовыделение, $\text{м}^3/\text{мин}$; c_0 – концентрация газа в поступающей струе воздуха, %.

Эта формула получена путём упрощения с допущениями. В ряде документов [164] в формуле в числителе добавляется коэффициент k_n , учитывающий неравномерность газовыделения, и формула принимает вид

$$Q = \frac{100 \cdot I \cdot k_n}{c_{\text{ПДК}} - c_0}. \quad (2.30)$$

Коэффициент неравномерности метановыделения определяется по формуле

$$k_n = 1,94 I^{-0,14}, \quad (2.31)$$

в этом случае формула (2.30) примет вид

$$Q = \frac{194 \cdot I^{0,86}}{c_{\text{ПДК}} - c_0} \quad (2.32)$$

Данная зависимость носит явно эмпирический характер, что существенно ограничивает условия её применения.

Также коэффициент неравномерности газовыделения предлагается брать из таблицы 2.6 по Руководству [207].

Таблица 2.6 – Значения коэффициента неравномерности метановыделения

Среднее метановыделение из очистной выработки выемочного участка, м ³ /мин	0,2-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-3,0	3,0-4,0	4,0-6,0	6,0-10,0	10,0-15,0	15,0-20,0	более 20,0
Значения k_n	2,43-2,14	2,14-1,94	1,94-1,83	1,83-1,76	1,76-1,66	1,66-1,60	1,60-1,51	1,51-1,40	1,40-1,33	1,33-1,28	1,28

Для выделения углекислого газа – по таблице 2.7 того же Руководства [207].

Таблица 2.7 – Значения коэффициента неравномерности выделения углекислого газа

Среднее выделение углекислого газа в очистной выработке, м ³ /мин	Значение коэффициента неравномерности выделения углекислого газа для условий Кузнецкого, Печорского и других восточных бассейнов и месторождений
0,3	2,10
0,6	1,53
0,9	1,32
1,2	1,20
1,5	1,14
1,8	1,10
2,1 и более	1,07

Данные таблиц устарели, т.к. получены для других горно-геологических условий. Применение формул (2.29 – 2.32) подразумевает постоянное газовыделение и не учитывает возможные их колебания, что ещё раз указывает на необходимость правильного прогноза поступления вредных и опасных примесей в рудничную атмосферу. Начальная концентрация также может изменяться во времени.

2.3.5. Анализ методик расчёта необходимого и достаточного количества воздуха по тепловыделениям

Расчёт расхода воздуха по тепловому фактору определяется по формуле [81]

$$Q_{\text{тепл.}} = \frac{T_{\text{общ.}}}{C_y \cdot (t_y - t_{\text{п}}) \cdot \rho \cdot 60}, \quad (2.33)$$

где $T_{\text{общ.}}$ – общее количество тепловыделения в выработку, кДж/ч; t_y – температура воздуха, исходящего из выработки, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{п}}$ – температура воздуха, поступающего в выработку, $^{\circ}\text{C}$; ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_y – удельная теплоёмкость, $\text{кДж}/(\text{кг } ^{\circ}\text{C})$.

По внутренней методике расчёта воздуха для рудников г. Норильска, разработанной Горным институтом УрО РАН, количество воздуха, необходимое для проветривания призабойного пространства горных выработок для снижения температуры, выделяющегося от оборудования, определяется по формуле

$$Q_{\text{тепл.}} = \frac{T_{\text{общ.}} \cdot k_3}{(26 - t_{\text{п}}) \cdot C_v \cdot \rho}. \quad (2.34)$$

Данная формула (2.34) отличается от (2.33) наличием коэффициента k_3 , учитывающим время работы горного оборудования в выработке.

Расчёт по данной зависимости прост при допущении, что величины тепловыделения, плотность воздуха, температура воздуха, поступающего в горные выработки и исходящая из них, не изменяются во времени. Однако, это не так. Если температура поступающего воздуха равна 26°C , то данное выражение некорректно использовать. При использовании максимально возможных величин, разрешенных ПБ, полученный расход воздуха можно использовать как некий ориентир при выборе вентиляторной установки. При высоких значениях количества воздуха, необходимого для снижения температуры до нормативных требований, можно рассмотреть другой вариант технологии ведения горных работ, выбрать другое оборудование или предусмотреть охлаждение воздуха.

2.3.6. Требования по скоростному режиму движения воздуха в горных выработках

Для выработок, в которых нет источников выделения вредных и опасных примесей, источников тепловыделения, расчёт производится по нормативам скорости движения воздуха.

В Правилах безопасности [9, 184, 250] указаны минимальные и максимальные допустимые значения скорости движения воздуха. Данные значения обусловлены недопущением образования скоплений вредных и опасных газов. При этом низкие скорости движения воздуха приводят к изменению режима проветривания с турбулентного на ламинарный, что может способствовать образованию местных и слоевых скоплений метана.

Значения минимальной скорости движения воздуха в действующих Правилах безопасности для разных горных объектов различны (для угольных шахт 0,15 м/с, для рудников, используя формулу на $V_{\min} = 0,1 \cdot P/S$ [9], для некоторых горных выработок менее 0,1 м/с). Для шахт, опасных по газу минимальная скорость движения воздуха устанавливается отдельными пунктами Правил безопасности. В условиях ведения горных работ скорости менее 0,15 м/с не поддаются измерению, т.к. в настоящее время не существует столь точных приборов для шахт и рудников, способных надёжно определять малые скорости движения воздуха [48].

Поэтому минимальная допустимая скорость движения воздуха должна соответствовать порогу чувствительности применяемых приборов, обеспечивая автомоделный турбулентный режим движения воздуха.

2.4. Расчёт аэродинамического сопротивления

При движении воздуха по горным выработкам часть кинетической энергии переходит в потенциальную энергию (тепло). Принято считать, что переход энергии связан с аэродинамическим сопротивлением. Другими

словами при движении рудничного воздуха статическое давление уменьшается вследствие действия аэродинамического сопротивления.

В классической отечественной рудничной аэрологии [192, 220, 221, 240, 241] принято подразделять аэродинамическое сопротивление на три вида: сопротивление трения, местные и лобовые сопротивления. Однако, руководствуясь работами М. Смолуховского, А. Энштейна, Б. Станкевича, Д. Максвела [20, 224, 225, 277-280, 327-329, 330] существует ещё и четвёртый вид аэродинамического сопротивления, который нельзя отнести ни к одному из вышеперечисленных, это внутреннее трение движущихся потоков воздуха, которые не учитываются в действующих методиках, но в некоторых условиях оно существенно. Его проявление наблюдается при естественной тяге и при проветривании тупиковых горных выработок.

Аэродинамическое сопротивление трения – это эмпирически получаемое значение. Впервые данное понятие было сформулировано в 1821 году французским инженером М. Р.-S. Girard’ом [306]. Им проводятся общие исследования по движению смеси различных газов по трубкам с учётом аэродинамического сопротивления. В 1828 году французским горным инженером М. D’Aubuisson’ом [301] также проводятся опыты по определению потерь давления в результате движения воздуха на бельгийской шахте Rancié. Данные работы, по исследованиям А.А. Скочинского [219], легли в основу всех современных расчётов депрессии, затрачиваемой на преодоление аэродинамического сопротивления, которая определяется по формуле

$$h = \beta \cdot \frac{L \cdot P}{S} \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \cdot \rho, \quad (2.35)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; P – периметр горной выработки, м; S – площадь сечения горной выработки, м²; L – длина горной выработки, м; U – скорость движения воздуха, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Величина β является безразмерным эмпирическим коэффициентом, зависящим от шероховатости стенок, и, по данным А.А. Скочинского [218], – «от некоторых других причин», о которых будет сказано дальше.

В российской горной науке [192, 218, 222, 220] величину $\beta \cdot \rho / 2g$ объединили в один коэффициент, дали ему символ « α » и назвали его коэффициент аэродинамического сопротивления трения (коэффициент альфа), при этом считая постоянные величины плотности рудничной атмосферы и ускорения свободного падения.

Во всех англоязычных странах аэродинамическое сопротивление и метод определения аэродинамического сопротивления трения носят имя J.J. Atkinson'a [293], который внёс значительный вклад в развитие исследований в данной области.

В отечественной науке вопросами изучения и определения величины аэродинамического сопротивления трения занималась А.И. Ксенофонтова [133] и её ученики.

Сегодня подобных исследований не проводится. На некоторых горных предприятиях коэффициент аэродинамического сопротивления трения определяется опытным путём. Часто коэффициент принимают по справочным данным, близким к имеющимся условиям с подобным типом крепи и т.п.

При использовании специальных программных средств расчёта воздухораспределения в шахтной вентиляционной сети правильность введения исходных данных определяет корректность результатов вычислений. Один из основных исходных параметров, вносимых вручную пользователем, является коэффициент аэродинамического сопротивления трения. Встречаются случаи, когда у одной и той же горной выработки, разделённой на ветви, разные коэффициенты аэродинамического сопротивления трения (рисунок 2.20). Это делается для того, чтобы привести в соответствие результаты проведённых воздушно-депресссионных съёмок с результатами расчёта в программном комплексе. Данный способ перебора значений менее трудозатратен, чем поиск ошибки в введённых ранее значениях исходных данных. В таких случаях ошибки копятся и делают данные схемы не пригодными к использованию в тактических расчётах при организации планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий.

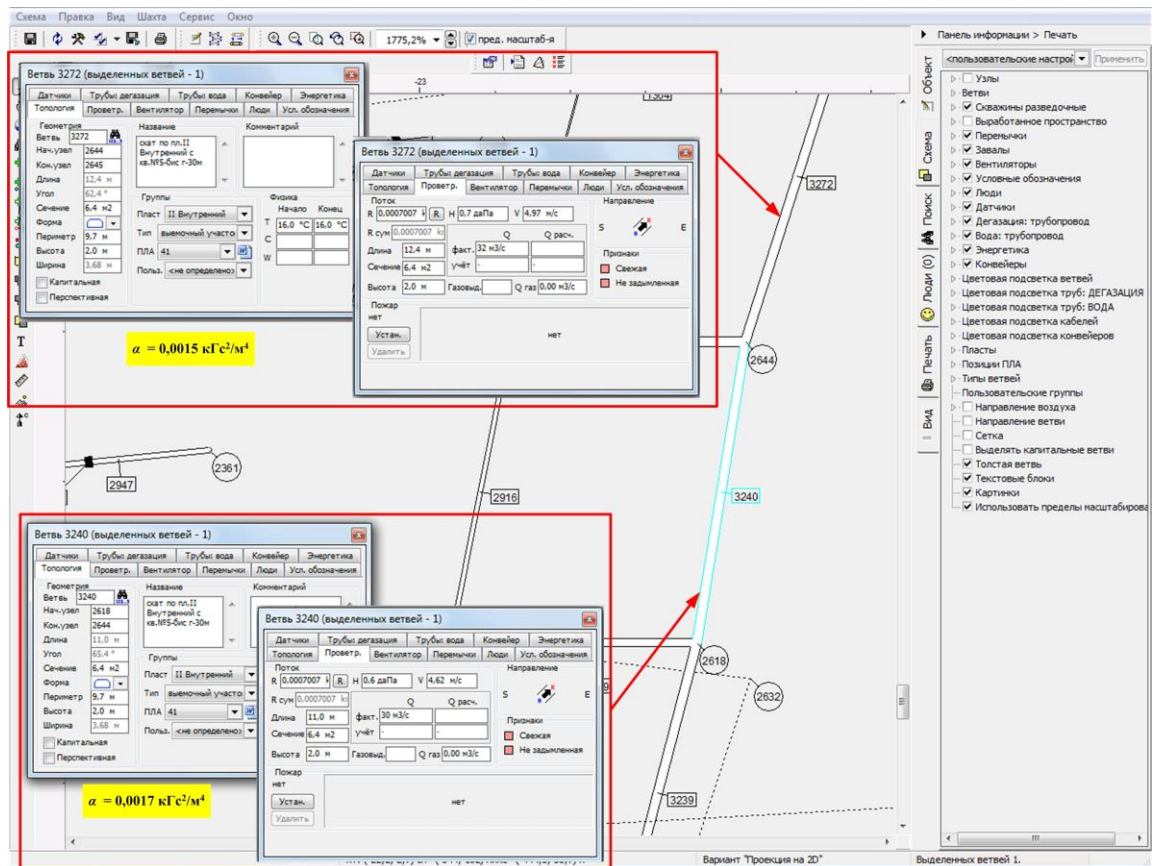


Рисунок 2.20 – Данные сверки параметров двух ветвей одной горной выработки

В действующих европейских стандартах SIA 196 [350] принят другой подход: для воздухопроводов коэффициент аэродинамического сопротивления трения нормирован и разделён на три класса S, A, B (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Европейские классы качества воздухопроводов

Класс воздуховода	Безразмерный коэффициент аэродинамического трения, λ	Величина нормируемой утечки, f^* , $\text{м}^2/\text{м}^2$
S – воздуховод	0,015	$5 \cdot 10^{-6}$
A – воздуховод	0,018	$10 \cdot 10^{-6}$
B – воздуховод	0,024	$20 \cdot 10^{-6}$

Перерасчёт на отечественный коэффициент аэродинамического сопротивления α делается по следующей зависимости [228]

$$\alpha = \lambda \cdot \rho / 8, \text{ кг} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4. \quad (2.36)$$

И для горных выработок введены нормируемые коэффициенты аэродинамического сопротивления трения (таблица 2.9).

К высшему классу должны соответствовать все новые воздухопроводы. При этом коэффициент может быть значительно ниже требуемого значения. По

факту это может привести к тому, что сопротивление воздуховода будет ниже расчётной величины и в забой будет подано больше воздуха, чем рассчитано, или рабочая точка выйдет за пределы оптимальной работы вентилятора с высоким коэффициентом полезного действия.

К низшему классу относятся воздуховоды уже использованные ранее и находящиеся в плохом состоянии. Этому классу должны соответствовать применяемые материалы и воздуховоды. Тут может наблюдаться обратная ситуация: фактическое значение коэффициента может быть выше и в результате сопротивление будет больше, при этом количество воздуха уменьшится.

Известно, что на величину коэффициента аэродинамического сопротивления (α , $1 \text{ км} = 1 \text{ кГ} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$) влияет форма и периметр воздуховода, что сегодня не учитывается в расчётах за неимением данных, но влияние их существенно. Так, например, используя номограмму потерь давления в воздуховодах компании Jensen Ventilation AB (приложение 2) путём элементарных вычислений, было установлено, что коэффициент аэродинамического сопротивления у воздуховода, выполненного из одного материала, но с разным диаметром, отличаются. При увеличении диаметра воздуховода величина коэффициента аэродинамического сопротивления трения возрастает более чем в два раза (рисунок 2.21).

Физический смысл величины безразмерного эмпирического коэффициента (β) не установлен. Определить его можно только опытным путём для конкретных условий ведения горных работ. Величина его зависит от большого числа факторов способа крепления горных выработок, горных пород, формы горных выработок, способа проходки и т.д.

Таблица 2.9 – Американские нормируемые значения коэффициента сопротивления трения

	Коэффициент трения, α кг/м ³	Коэффициент трения, β (безразмерный)
Rectangular Airways		
Smooth concrete lined	0.004	0.0067
Shotcrete	0.0055	0.0092
Unlined with minor irregularities only	0.009	0.015
Girders on masonry or concrete walls	0.0095	0.0158
Unlined, typical conditions no major irregularities	0.012	0.020
Unlined, irregular sides	0.014	0.023
Unlined, rough or irregular conditions	0.016	0.027
Girders on side props	0.019	0.032
Drift with rough sides, stepped floor, handrails	0.04	0.067
Steel Arched Airways		
Smooth concrete all round	0.004	0.0067
Bricked between arches all round	0.006	0.01
Concrete slabs or timber lagging between flanges all round	0.0075	0.0125
Slabs or timber lagging between flanges to spring	0.009	0.015
Lagged behind arches	0.012	0.020
Arches poorly aligned, rough conditions	0.016	0.027
Metal Mines		
Arch-shaped level drifts, rock bolts and mesh	0.010	0.017
Arch-shaped ramps, rock bolts and mesh	0.014	0.023
Rectangular raise, untimbered, rock bolts and mesh	0.013	0.022
Bored raise	0.005	0.008
Beltway	0.014	0.023
TBM drift	0.0045	0.0075
Coal Mines: Rectangular entries, roof-bolted		
Intakes, clean conditions	0.009	0.015
Returns, some irregularities/ sloughing	0.01	0.017
Belt entries	0.005 to 0.011	0.0083 to 0.018
Cribbed entries	0.05 to 0.14	0.08 to 0.23
Shafts¹		
Smooth lined, unobstructed	0.003	0.005
Brick lined, unobstructed	0.004	0.0067
Concrete lined, rope guides, pipe fittings	0.0065	0.0108
Brick lined, rope guides, pipe fittings	0.0075	0.0125
Unlined, well trimmed surface	0.01	0.0167
Unlined, major irregularities removed	0.012	0.020
Unlined, mesh bolted	0.0140	0.023
Tubbing lined, no fittings 0.007 to 0.014	0.007 to 0.014	0.0012 to 0.023
Brick lined, two sides buntions 0.018	0.018	0.030
Two side buntions, each with a tie girder 0.022	0.022	0.037
Longwall faceline with steel conveyor and powered supports²		
Good conditions, smooth wall	0.035	0.058
Typical conditions, coal on conveyor	0.05	0.083
Rough conditions, uneven faceline	0.065	0.108
Ventilation ducting³		
Collapsible fabric ducting (forcing systems only)	0.0037	0.0062
Flexible ducting with fully stretched spiral spring reinforcement	0.011	0.018
Fibreglass	0.0024	0.0040

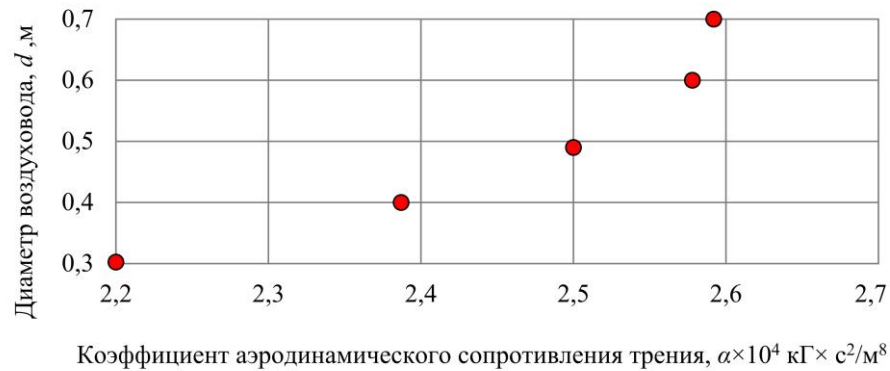


Рисунок 2.21 – Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления трения от диаметра воздуховода, изготовленного из одного материала

Исследованиям местных сопротивлений посвящены работы А.А. Харева [133, 259] и М.А. Сёмина [212], в них говорится о сложности данного вида аэродинамического сопротивления и трудностях определения величины коэффициента местных сопротивлений. Особенно данный вопрос актуален при реверсировании воздушной струи [156, 157, 213], что существенно сказывается на безопасности ведения горноспасательных работ. Местные сопротивления иногда вызывают столь значительные потери давления, что их нельзя не учитывать при расчёте общешахтного сопротивления и при выборе вентилятора главного проветривания [258].

При подсчёте общешахтной депрессии $h_{ш.}$ должны учитываться как сопротивление трения, так и местные сопротивления.

На практике при подсчёте величины местного сопротивления используют эмпирический безразмерный коэффициент ζ , определяемый для каждого отдельного вида местных потерь опытным путём.

Потеря давления на участке местного сопротивления выражается формулой

$$h_{м.с.} = \zeta \cdot h_v = \zeta \cdot \frac{V_{ср.}^2 \cdot \delta}{2g}, \quad (2.37)$$

где $h_{м.с.}$ — разность давления (депрессия), теряемая при прохождении воздуха через местное сопротивление, в $\text{кг}/\text{м}^2$; ζ — безразмерный коэффициент, полученный

опытным путём для каждого в отдельности вида местных сопротивлений и называемый коэффициентом местных сопротивлений; h_v – скоростная депрессия (динамическая депрессия), равная

$$h_v = \frac{V_{\text{ср.}}^2 \cdot \delta}{2g}. \quad (2.38)$$

$V_{\text{ср.}}$ – средняя скорость движения воздуха в м/с, до или после местного сопротивления, обычно принимается скорость воздуха после местного сопротивления; δ – удельный вес воздуха (зависит от места измерения и в отличие от плотности воздуха ρ не является физико-химической характеристикой вещества), кг/м³; g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Влияние местных сопротивлений можно показать на примерах объектов подземного строительства. Анализ существующего расчёта на предприятии показал целый ряд важных моментов [105]. Во-первых, основное сопротивление движению воздуха оказывают местные сопротивления – повороты вентиляционного трубопровода, по которому подают воздух в проходческий забой (схема представлена на рисунке 2.22). Во-вторых, к депрессии на преодоление местных сопротивлений, вызванных поворотами, прибавляется депрессия (34 даПа), обусловленная наличием решетки на конце вентиляционного трубопровода, и депрессия (15,3 даПа), обусловленная наличием зонта вытяжного воздуховода. Депрессия, обусловленная аэродинамическим трением трубопровода почти в десять раз меньше суммы депрессий, вызванных местными сопротивлениями, и находится в диапазоне от 1,2 до 8,4 даПа, в зависимости от длины трубопровода, что в свою очередь зависит от длины выработки. Депрессия, обусловленная сопротивлением трения выработки и применяемого там типа крепи 98 СНО, 98 СН, 98 СС (с рассчитанным и полученным экспериментально коэффициентом $\alpha = 0,0016 \text{ км}$, диаметр ствола 9,8 м²). Общая депрессия наклонного ствола при строительстве станции метро «Петровско-Разумовская» (г. Москва, 2014 г.) приведённая на рисунке 2.23, наглядно показывает соотношение величины депрессии трения и депрессии, затрачиваемой на преодоление местных сопротивлений.

Также характерным примером необходимости учёта местных сопротивлений является проветривание строящихся стволов ВС-10 и СКС-1 в г. Норильске. Общие схемы проветривания приведены на рисунке 2.24. Здесь видно, что даже при простом последовательном соединении имеется большое количество местных сопротивлений – поворотов под разными углами, переходных элементов с изменением формы сечения.

Измерения депрессии, определение величин коэффициентов местных сопротивлений позволили построить сводные депрессиограммы для строящихся стволов (рисунки 2.25 и 2.26). По данным графикам видно, что доля депрессии, затрачиваемой на преодоление величины местных сопротивлений, занимает более половины от депрессии, затрачиваемой на преодоление сопротивления трения.

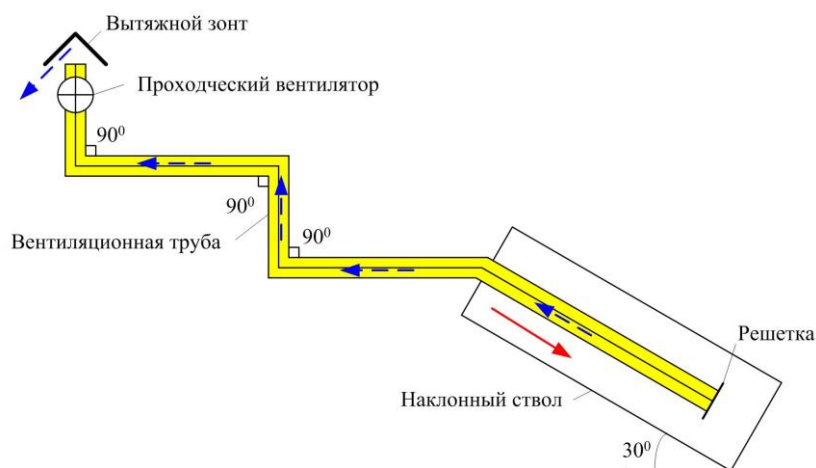


Рисунок 2.22 – Схема проветривания при строительстве наклонного вестибюля станции метро «Петровско-Разумовская»

На практике при проектировании систем вентиляции, при выборе вентилятора исходят только из необходимого количества воздуха, не производя расчёт сопротивления. Вентиляционную установку выбирают методом подбора из имеющихся вентиляторов, обеспечивающих номинальную подачу требуемого расхода.

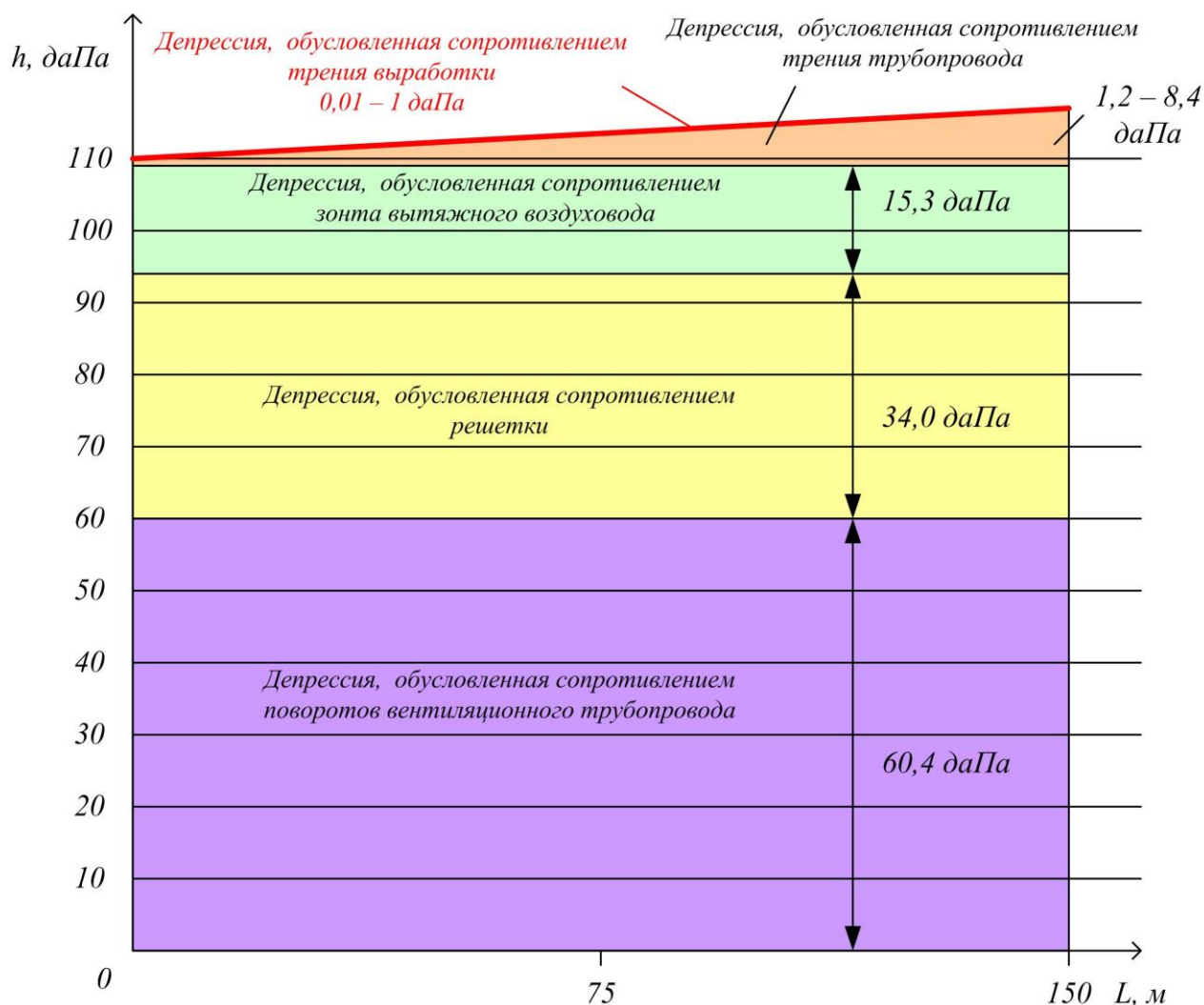


Рисунок 2.23. Общая депрессия наклонного ствола при строительстве станции метро «Петровско-Разумовская», г. Москва, 2014 г.

При этом депрессия выбранного вентилятора может оказаться недостаточной для подачи расчётного расхода воздуха.

Как отмечает А.А. Харёв «математической зависимости между геометрическими параметрами и особенностями объектов местных сопротивлений, с одной стороны, и кинематическими и динамическими свойствами потока, с другой, пока еще не установлено» [258]. Действительно, такой зависимости не установлено, потому что провести теоретические исследования на молекулярно-кинетическом уровне на участках объектов местных сопротивлений очень трудно, ввиду сложности происходящих

явлений. Теоретические исследования заменяются более простым способом изучения – физическими экспериментами, на основе которых получены приближенные эмпирические зависимости. Их основной недостаток заключается в том, что для каждого местного сопротивления необходимо получать свою зависимость или свои эмпирические коэффициенты [258].

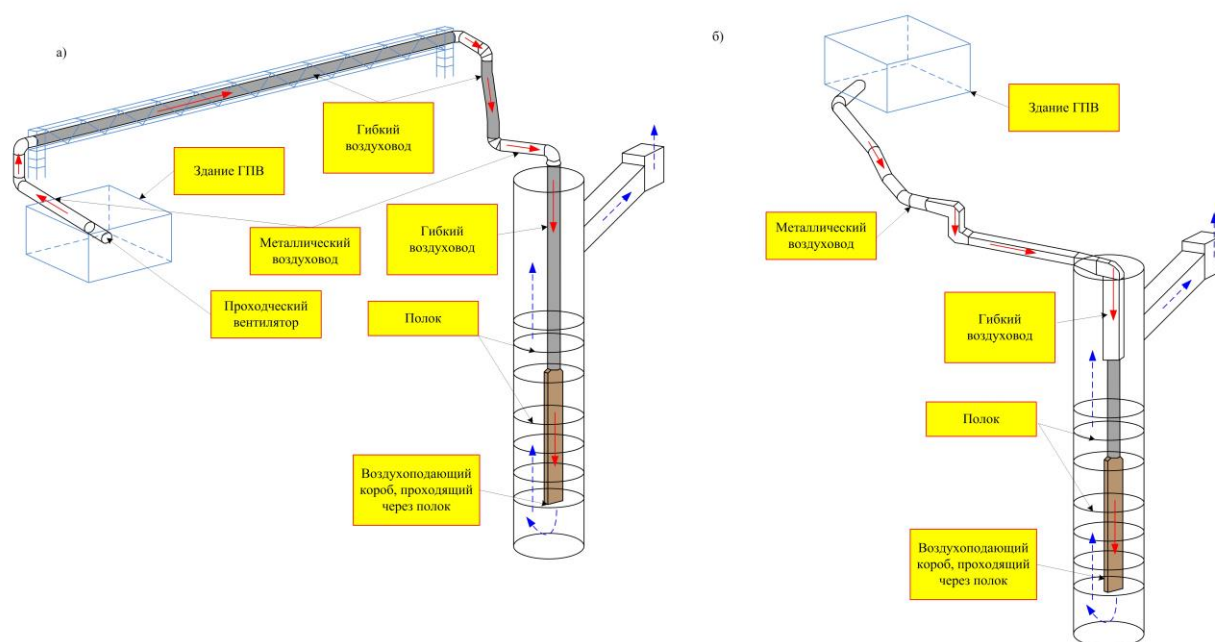


Рисунок 2.24 – Схема проветривания стволов: а) СКС-1 и б) ВС-10

Часто методиками проектирования проветривания расчёт величины местных сопротивлений вообще не предусмотрен. Например, в методике [207] вводится коэффициент учитывающий одновременно местные и лобовые сопротивления $k_{м.с.} = 0,9$, отдельно вводится коэффициент, учитывающий потери депрессии в канале вентилятора $k_{к.в.} = 0,9$, а для учёта потерь давления на преодоление воздухоохладителя – не указан, хотя в расчёте должен быть учтён.

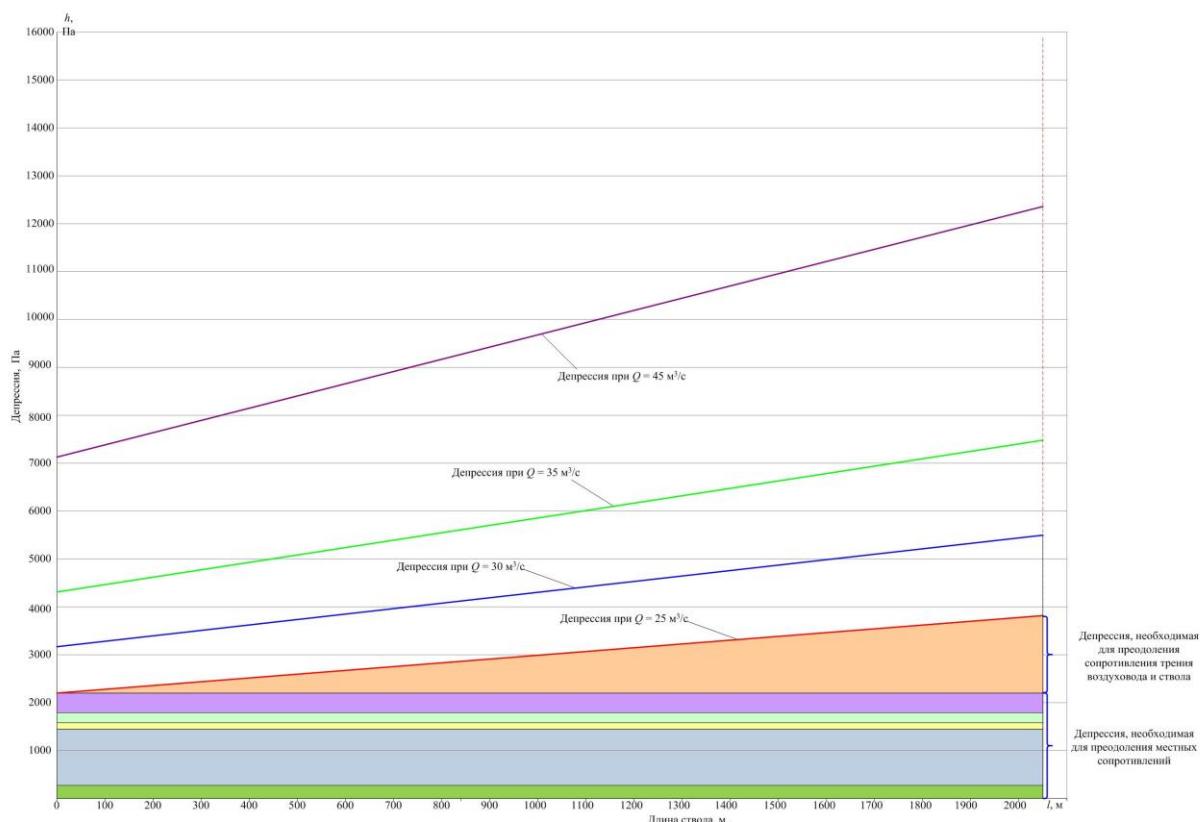


Рисунок 2.25 – Депрессиограмма ствола СКС-1

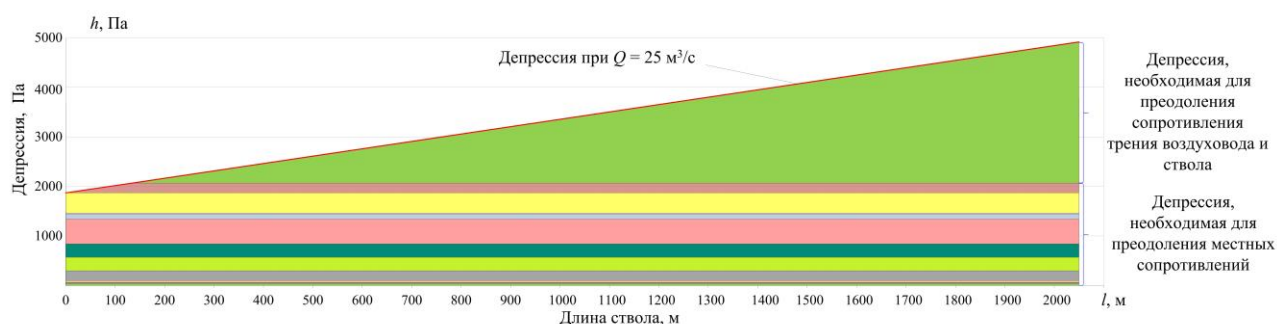


Рисунок 2.26 – Депрессиограмма ствола ВС-10

Лобовые сопротивления методиками не учитываются и при анализе проектов по вентиляции нигде не встречаются. Хотя при использовании горного оборудования и техники больших размеров величина лобового сопротивления существенна и её нельзя не учитывать.

Лобовые сопротивления создаются, как правило, движущимися оборудованием (например, электро- или дизелевозы, порододоставочные машины и т.п.) и учёт их при проектировании не производится. Иногда они учитываются коэффициентом запаса в локальных местах или на отдельных

участках. В существующих методиках их объединяют с местными аэродинамическими сопротивлениями или с сопротивлением трения. Однако, если данное оборудование располагается в одной из выработок диагонального соединения, то при определённых условиях возможно опрокидывание воздушной струи.

2.5. Определение депрессии шахт и рудников

Расчёт величины депрессии, необходимой для проветривания шахты или рудника, является важнейшим завершающим этапом для выбора вентиляторной установки.

Депрессия определяется по полученным ранее величинам количества воздуха с учётом утечек и рассчитанной величиной аэродинамического сопротивления (трения, местные сопротивления и лобовые).

Согласно Руководству [207], «депрессия рассчитывается по годам или наиболее характерным периодам развития горных работ», то есть предполагается, что при проектировании горных работ заранее будут определены все величины по производительности, применяемой технологии и технике.

Расчёт депрессии по наиболее трудно проветриваемому маршруту при ручных расчётах для больших вентиляционных сетей даёт большую погрешность, так как сложные соединения не поддаются анализу [265].

При этом нормами технологического проектирования вводится предельная величина депрессии шахты. Она определяется как вредная и опасная для человека. Однако изменение давления приводит к изменению плотности воздуха и, как следствие, – изменению величины коэффициента аэродинамического сопротивления трения.

Применение компьютерных программ позволило осуществлять сетевые расчёты с большой точностью (относительно ручных расчётов) и небольших

трудозатратах. Однако проблема с выбором величины коэффициента аэродинамического сопротивления трения на стадии проектирования остаётся.

В общем случае расчёт депрессии осуществляется по формуле Д. Бернули [219]. При использовании данной формулы вводится допущение, что изменение давления, температуры и влажности в движущемся воздухе происходит по тому же закону, что и в воздухе, находящемся в покое.

Однако, при проведении взрывных работ, при включении и выключении вентиляторных установок [91], при открывании и закрывании вентиляционных дверей происходят резкие перепады давления, которые не только негативно влияют на здоровье горнорабочих, но также могут привести к опрокидыванию воздушной струи, что необходимо учитывать при выборе режима работы вентиляторов. Так, например, величина избыточного давления при проведении взрывных работ при строительстве ствола ВС-10 в г. Норильске составляет 30 – 80 % от давления развиваемого вентиляторной установки (рисунок 2.27).



Рисунок 2.27 – Результат натурных измерений величины избыточного давления при проведении взрывных работ

2.6. Расчёт естественной тяги

При проектировании проветривания горных предприятий необходимо учитывать естественную тягу [108, 109, 113]. На неё в горных выработках обращали особое внимание с самого начала развития горного дела. В первом

известном нам научном труде о горном деле Georgius'a Agricola [1] даётся лишь краткое сообщение о явлении естественного движения воздуха по горным выработкам («отъ чего употребительные у рудокоповъ ночники и свечки погасали»), без работы специальных устройств («воздушных машин»).

В работе М.В. Ломоносова [159] даётся подробное описание естественной тяги. Важно отметить, что это первая научно-исследовательская работа (1742 г.) в области рудничной вентиляции в России и в мире. Впервые на основе натурных наблюдений, произведённых на рудниках Саксонии, описан и научно обоснован процесс движения воздуха по горным выработкам в различное время года (лето, весна, осень и зима). Отдельно отмечается период времени года, когда движение воздуха не устойчиво, намекая на вопросы безопасности ведения горных работ. На основе известных законов гидродинамики М.В. Ломоносов объясняет все протекающие процессы, точно определяет причины естественной тяги – разности плотностей воздуха и влияние высоты столба воздуха. Говорит о том, что воздух зимой быстро нагревается от горных пород, а летом охлаждается, закладывая основы теплофизики горных пород. Делает наблюдения о скорости изменения температуры воздуха и обледенении горных выработок. Интересен и тот факт, что в конце работы, М.В. Ломоносов даёт чёткие рекомендации горнопромышленникам, как улучшить вентиляцию, используя только естественную тягу: первое – путём увеличения разности высот между местами, где воздух подаётся и где выдаётся, и второе – путём изменения плотности воздуха за счёт нагрева его в вентиляционной горной выработке. Второй способ был разрешён Правилами безопасности 1915 г. и активно использовался вплоть до 1915 года.

В настоящее время не на всех горных предприятиях учитывают естественную тягу. Обосновывая это тем, что величина её незначительна по отношению к депрессии, развиваемой вентилятором главного проветривания. Однако проведённые исследования на шахте «Эстония» [209], занимающейся добычей горючего сланца, показали обратное. Шахта работает неполную

рабочую неделю. Ввиду того, что газовыделение из разрабатываемого пласта и вмещающих пород отсутствует, а основные источники загрязнения шахтной атмосферы – технологические процессы (работа автотранспорта и буровзрывные работы), в выходные дни также не работают, проветривание всей шахты прекращается.

Стационарные датчики контроля скорости движения воздуха работают постоянно. Данные с датчиков с одного блока представлены на рисунке 2.28.

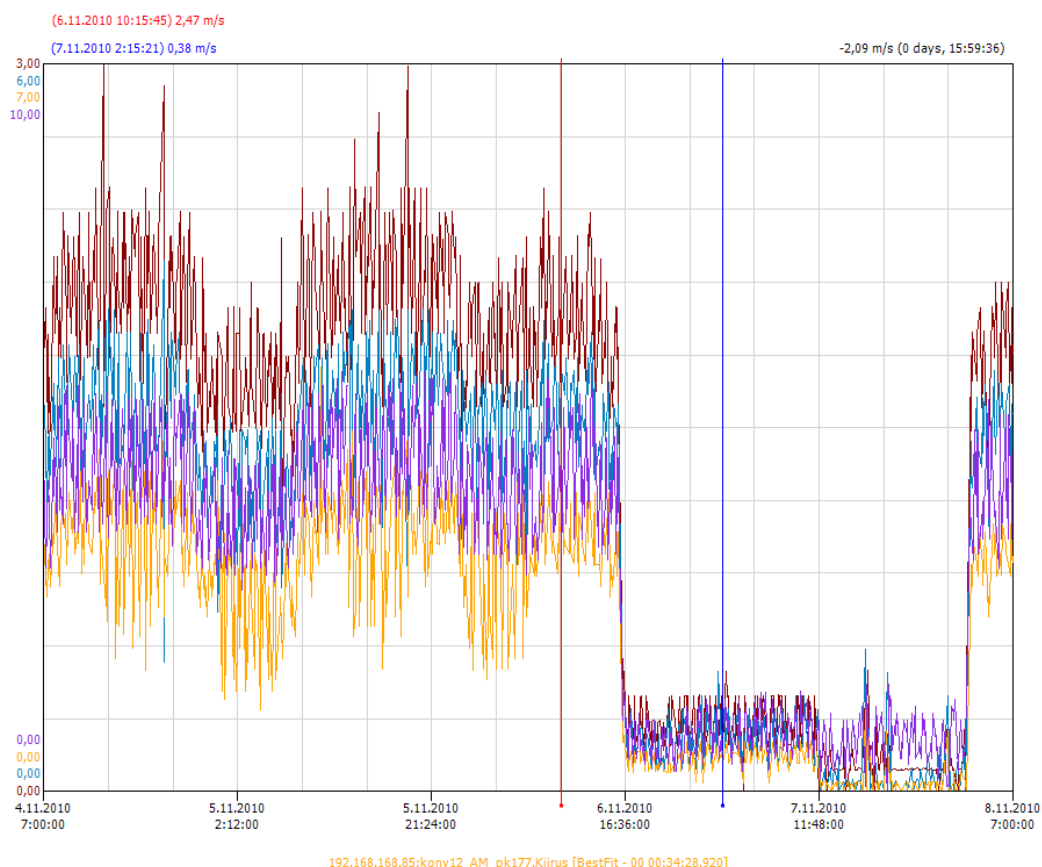


Рисунок 2.28 – Показания с датчиков скорости движения воздуха в шахте «Эстония»

Из показаний датчиков отчётливо видно суточное колебание скорости движения воздуха за счёт действия естественной тяги. Днём температура воздуха на поверхности растёт, увеличивается разница температур, растёт скорость движения воздуха: ночью, наоборот, температура воздуха на поверхности падает, уменьшается разница температур, падает скорость движения воздуха. Также из графика видно, что при выключении вентиляторов главного проветривания движение воздуха в горных выработках не

прекращается. При этом величина скорости движения воздуха при действии одной естественной тяги составила от 7 до 26% скорости движения воздуха, обеспеченной за счёт совместной работы вентилятора и естественной тяги.

При ведении горных работ на больших глубинах, где температура горных пород высокая, температурный фактор и большая высота столбов воздуха приводят к увеличению депрессии естественной тяги.

Наглядным примером служат исследования, проведённые в коммуникационных коллекторах г. Москвы. Данные мониторинга параметров микроклимата коммуникационного коллектора с глубиной заложения 15-18 м приведены на рисунке 2.29. На графике приведены данные замеров исходящей струе, температуры воздуха на улице в районе проведения измерений и скорость движения воздуха, на исходящей струе. Запись со стационарных датчиков производилась через каждые 15 минут. В коллекторе проложен трубопровод с горячей водой (на поверхности труб температура 45°C).

Из графика чётко видны суточные колебания воздуха, связанные с изменением температуры воздуха на улице, а также видно, что при проветривании только за счёт естественной тяги средняя скорость движения воздуха равна 0,7 м/с, при включении вентилятора средняя скорость движения воздуха равна 1,1 м/с. Следовательно, доля депрессии естественной тяги в общей депрессии составляет 63%.

Вопросам определения величины депрессии естественной тяги в настоящее время уделяется мало внимания. В настоящее время существует несколько методик расчёта естественной тяги [294-296, 307-311, 331, 348, 363], основные формулы сведены в таблицу 2.10. Для разъяснения входящих в формулу параметров можно воспользоваться рисунком 23 [312].

Расчёт по зависимостям (2.42 – 2.46) легче производить в единицах измерения, принятых в англоязычных странах, так как перевод единиц в систему СИ в эмпирических формулах может привести к ошибкам вычисления (нет аналога константы специальной газовой постоянной R_i).

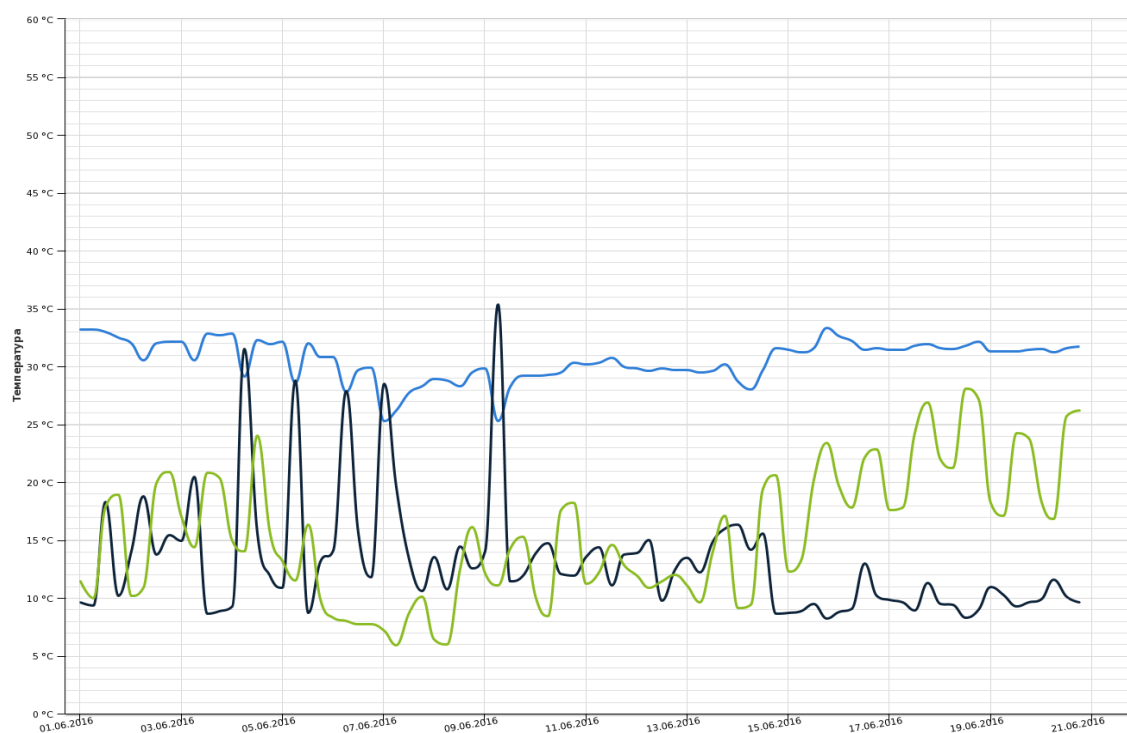


Рисунок 2.29 – Данные месячного мониторинга параметров микроклимата коммуникационного коллектора: синяя линия – температура исходящей струи воздуха; зеленая линия – температуры воздуха на улице; чёрная линия – скорость движения воздуха, на исходящей струе

В России для расчёта величины депрессии естественной тяги применяют зависимости (2.39 – 2.41). При этом применяют термодинамический и гидростатический методы расчёта. Термодинамический метод заключается в том, что тепловые процессы, происходящие в свободной атмосфере в шахтных условиях, рассматриваются в высотнo-термической системе координат. Гидростатический метод заключается в том, что величина депрессии естественной тяги определяется как разность поступающего и исходящего веса воздушных столбов единичной площади и одинаковой высоты, равной расстоянию между двумя горизонтальными плоскостями.

Таблица 2.10 – Зависимости для расчёта величины депрессии естественной тяги

№	Автор	Вид зависимости		Примечание
1	Воропаев А.Ф.	$h_{\text{е.т.}} = \frac{S'}{t_{\text{ср.}}} \cdot \rho$	(2.39)	Термодинамический метод, результаты расчёта в кГ/м^2
2	Комаров В.Б.	$h_{\text{е.т.}} = \frac{P_{\text{атм.}} L}{100} \left[\frac{100}{R \cdot (273 + T_{\text{ср.п.}})} - \frac{100}{R \cdot (273 + T_{\text{ср.и.}})} \right]$	(2.40)	
3	Протодьяконов М.М.	$h_{\text{е.т.}} = L \cdot (\rho_{\text{п.}} - \rho_{\text{и.}})$	(2.41)	Аналог зависимости (35) Richard L. Sanford, результаты расчёта в мм вод. ст.
4	Weeks W.S	$h_{\text{е.т.}} = 13,6 \cdot (p_2 - p_3)$ <p>где p_2 и p_3 определяются из уравнений</p> $\ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) = \frac{L}{R_i \cdot T_{\text{ср.п.}}},$ $\ln \left(\frac{p_3}{p_1} \right) = \frac{L}{R_i \cdot T_{\text{ср.и.}}}$	(2.42)	Расчёт производится в единицах измерений, принятых в англоязычных странах (температура в $^{\circ}\text{R}$, длина в ft, давление в мм рт. ст.), результаты расчёта в мм вод. ст.
5	Richard L. Sanford	$h_{\text{е.т.}} = \frac{L}{5,2} (\rho_{\text{п.}} - \rho_{\text{и.}})$	(2.43)	Расчёт производится в единицах измерений, принятых в англоязычных странах (длина в ft, плотность воздуха в lb/ft^3), результаты расчёта в мм вод. ст.
6	Ress J.P.	$h_{\text{е.т.}} = \left(\frac{T_{\text{ср.и.}} - T_{\text{ср.п.}}}{5,2 \cdot T_{\text{ср.}}}} \right) \cdot \rho_{\text{ср.}} \cdot L$	(2.44)	Расчёт производится в единицах измерений, принятых в англоязычных странах (температура в $^{\circ}\text{R}$, длина в ft, плотность воздуха в lb/ft^3), результаты расчёта в мм вод. ст.

7	Hinsley F.B.	$h_{\text{с.п.}} = \frac{P_1}{5,2} \left[\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{L}{R_i(T_2-T_1)}} - \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{L}{R_i(T_3-T_4)}} \right]$	(2.45)	Расчёт производится в единицах измерений, принятых в англоязычных странах (давление в мм вод. ст., температура в $^{\circ}\text{R}$, длина в ft, плотность воздуха в lb/ft^3), результаты расчёта в мм вод. ст.
8	McElroy G.E.	$h_{\text{с.п.}} = 0,03 \cdot \left(\frac{T_{\text{ср.и.}} - T_{\text{ср.п.}}}{10} \right) \cdot \left(\frac{L}{100} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{\text{п.}}}{\rho_{\text{ср.}}} \right)$	(2.46)	Расчёт производится в единицах измерений, принятых в англоязычных странах (температура в $^{\circ}\text{F}$, длина в ft, плотность воздуха в lb/ft^3), результаты расчёта в мм вод. ст.

Определение параметров, входящих в зависимости (2.42-2.46), следующие:

- среднеарифметическая температура воздуха, поступающего в шахту по стволу $T_{\text{ср.п.}}$, $^{\circ}\text{R}$, между точками 1 и 2 рисунка 2.32. (где $^{\circ}\text{R}$ – градус Ранкина $^{\circ}\text{R} = 450 + ^{\circ}\text{F}$, а $^{\circ}\text{F}$ – градус Фаренгейта $^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} \cdot 1,8 + 32$); среднеарифметическая температура воздуха, исходящего из шахты по стволу $T_{\text{ср.и.}}$, $^{\circ}\text{R}$, между точками 3 и 4, отмеченных на рисунке 2.32. среднеарифметическая температура воздуха $T_{\text{ср.}} = (T_{\text{ср.и.}} - T_{\text{ср.п.}})/2$, $^{\circ}\text{R}$; индивидуальная (специальная) газовая постоянная $R_i = 53,3533 \text{ (ft} \cdot \text{lb} \cdot \text{f)} / (\text{lb} \cdot ^{\circ}\text{R})$; L , ft – расстояние по вертикали от места поступления воздуха в шахту до самой нижней точки нисходящего проветривания ($1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ м}$); t , $^{\circ}\text{F}$ – температура воздуха в точках, указанных на рисунке 2.30; $\rho_{\text{п.}}$ и $\rho_{\text{и.}}$ – плотность воздуха соответственно в воздухоподающей и вентиляционной горной выработке, lb/ft^3 ($1 \text{ lb/ft}^3 = 16,0187 \text{ кг/м}^3$); $\rho_{\text{ср.}}$ – справочное значение плотности сухого воздуха, $\rho_{\text{ср.}} = 0,075 \text{ lb/ft}^3 = 1,2014 \text{ кг/м}^3$).

Определение параметров, входящих в зависимости (2.39-2.41), следующие:

- универсальная газовая постоянная $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot ^\circ\text{К})$; $P_{\text{атм.}}$ – атмосферное давление, мм рт. ст.; $T_{\text{ср.п.}}$ и $T_{\text{ср.и.}}$ – среднеарифметическая температура воздуха соответственно в воздухоподающей и вентиляционной горной выработке, $^\circ\text{С}$; $\rho_{\text{п.}}$ и $\rho_{\text{и.}}$ – плотность воздуха соответственно в воздухоподающей и вентиляционной горной выработке, $\text{кг}/\text{м}^3$; $t_{\text{ср.}}$ – средняя абсолютная температура центра тяжести фигуры или, в первом приближении, средняя абсолютная температура из двух крайних точек, $^\circ\text{К}$; S' – планиметрируемая площадь внутри замкнутого контура рисунка 2.31, $\text{м} \cdot ^\circ\text{С}$.

Для перевода величины естественной тяги 1 мм вод. ст. = 9,807 Па.

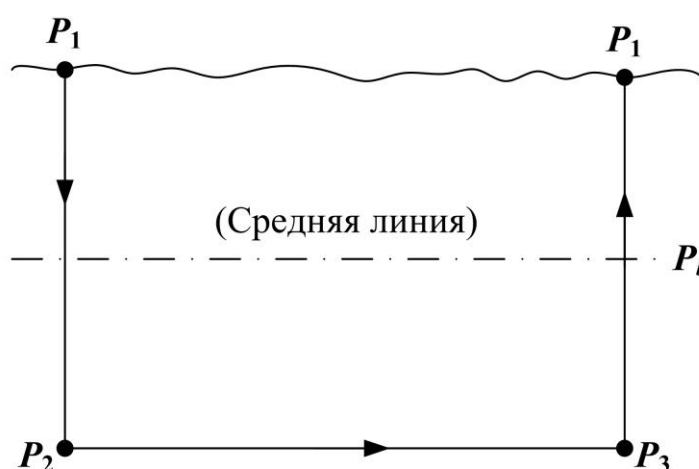


Рисунок 2.30 – Схема вентиляции шахты к таблице 8

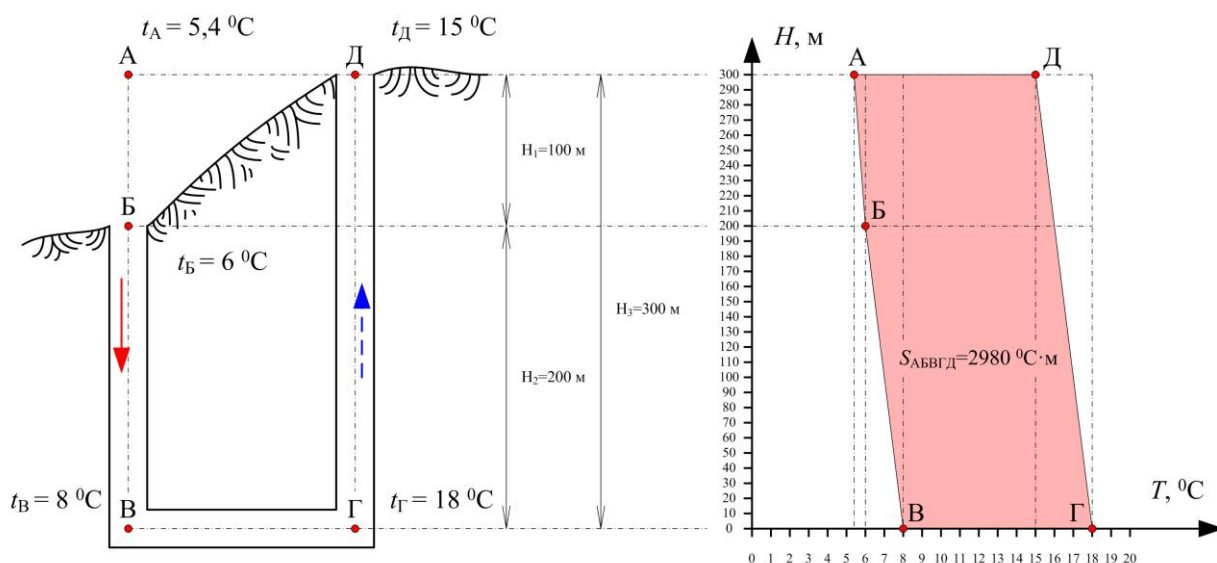


Рисунок 2.31 – Схема к определению величины депрессии естественной тяги по методу А.Ф. Воропаева [16]

Сегодня известно, что естественная тяга обусловлена естественными факторами, такими как:

- гравитационными силами, представляющими собой разность удельных давлений столбов воздуха;
- силой ветра (в виде его скоростного напора);
- состава шахтного воздуха (различный химический состав воздуха);
- разность температур воздуха в горных выработках;
- различной влажностью.

Как видно из вышеприведённых формул, химический состав и влажность воздуха напрямую не учтены. Однако, их можно учесть в величине плотности поступающего и исходящего воздуха в зависимостях (2.39, 2.41). Для этого можно воспользоваться зависимостями

$$\rho = \gamma / g, \text{ кг/м}^3 \quad (2.53)$$

и

$$\gamma = 1,293 \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{P_{\text{атм.}} - \frac{3}{8} \cdot \frac{W}{100} \cdot P_{\text{вод.паров}}}{760}, \quad (2.54)$$

где γ – удельный вес воздуха, Н/м³; t – температура воздуха, °С; g – ускорение свободного падения, $g = 9,807 \text{ м/с}^2$; $P_{\text{атм.}}$ – атмосферное давление, мм рт. ст.; W – относительная влажность воздуха, %; $P_{\text{вод.паров}}$ – давление насыщенных паров, мм рт. ст.

От правильности выбора вентилятора и учёта при этом величины депрессии, обусловленной естественной тягой, зависит недостающее или избыточное количество воздуха в шахте или руднике.

Еще одной важной особенностью естественной тяги является возможность образования противотока к основной воздушной струе в одной и той же выработке даже в штатных режимах работы (рисунок 2.32). Данное явление было зафиксировано автором при проведении натурных исследований на сланцевой шахте «Эстония» и в дальнейшем подтверждено (с измерением фактических значений расходов воздуха) при строительстве стволов ВС-10 и

СКС-1 шахты «Глубокая» рудника «Скалистый» в г. Норильске: при ведении горных работ в холодный период года, когда существенна разница между наружным атмосферным воздухом и исходящей струёй воздуха, по одной и той же вертикальной горной выработке движутся два потока. Первый – основной поток исходящей вентиляционной струи воздуха с температурой в районе 20-26⁰ С – движется вверх. Второй поток – вдоль бортов горной выработки (стенки ствола) с низкой или отрицательной температурой воздуха движется вниз.

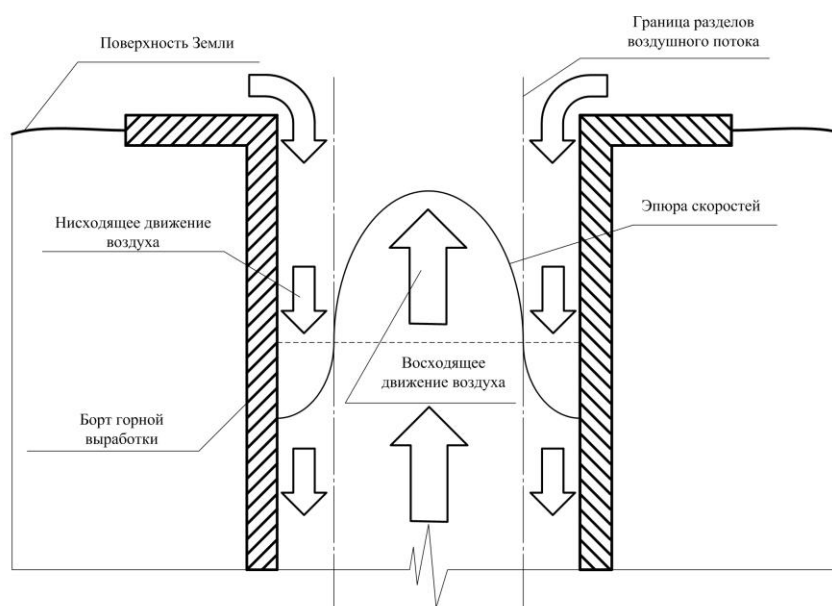


Рисунок 2.32 – Схема образования противотока воздушных струй

Это приводит к возникновению опасностей, таких как:

- обледенение горных выработок (рисунок 2.33);
- образования конденсата;
- разрушение крепи (рисунок 2.34);
- полного смерзания горных выработок, с дальнейшим нарушение вентиляции (рисунок 2.35);
- образование тумана (рисунок 2.36 и 2.37);
- наличие тумана в горных выработках (при присутствии оксидов азота и оксидов серы приводит к образованию слабых кислот, ускоряющих коррозию конструкций крепи);

- обрушение отколовшегося льда.

Аналогичное по происхождению и процессу протекания данное явление встречается в атмосфере Земли [164], при этом оно хорошо и детально описано.



Рисунок 2.33 – Обледенение вентиляционного шурфа шахты



Рисунок 2.34 – Пример нарушения обделки крепи вентиляционного шурфа шахты



Рисунок 2.35 – Полное замерзание горной выработки шахты

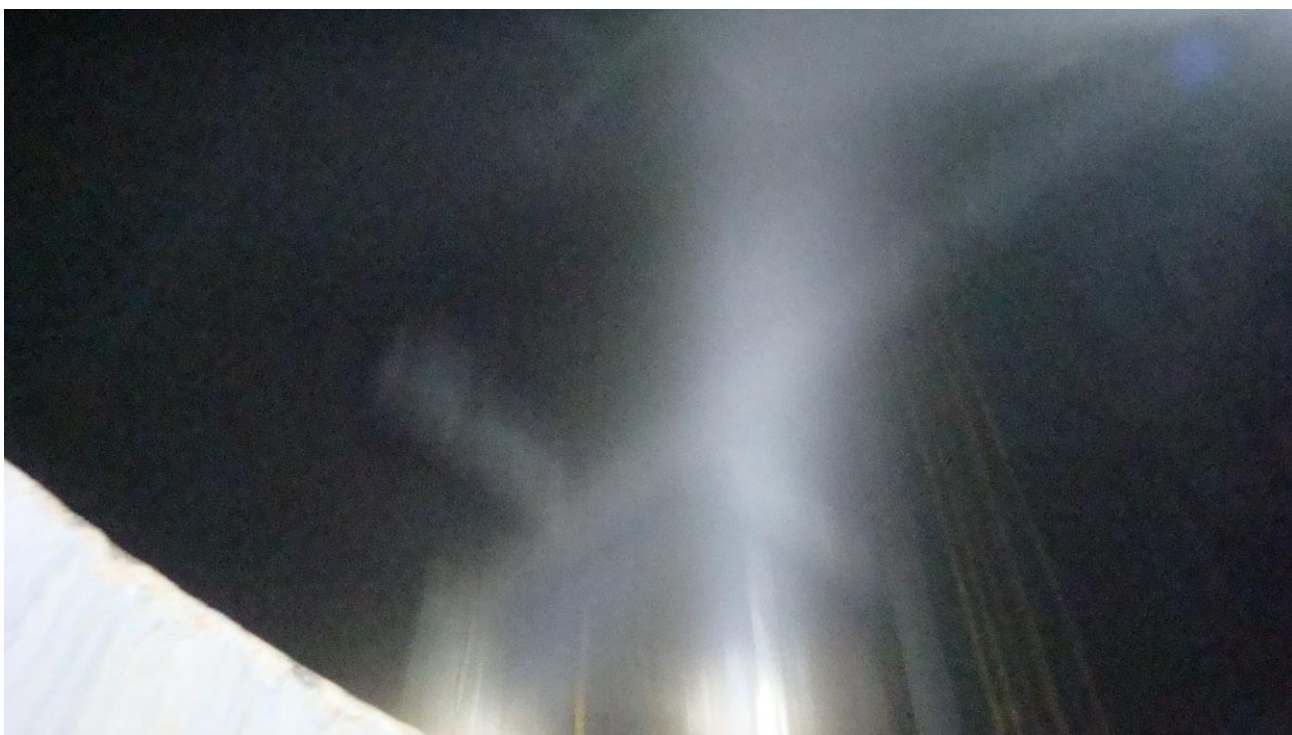


Рисунок 2.36 – Пример образования в вентиляционном стволе рудника



Рисунок 2.37 – Туманообразование в исходящей струе рудника

К естественной тяге следует отнести и движение газа против движения основного потока воздуха (например, метана при нисходящем проветривании (рисунок 2.38) или оксидов азота при восходящем проветривании) [103]. В этом случае также изменяется сечение воздушного потока и аэродинамическое сопротивление. Появляется внутреннее аэродинамическое сопротивление, о котором говорилось ранее.

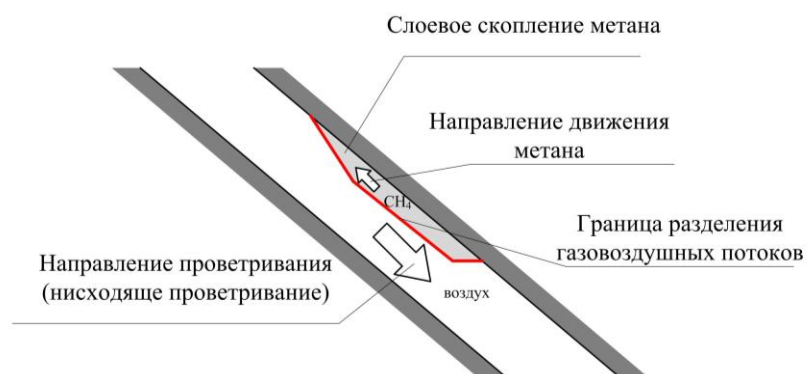


Рисунок 2.38 – Схематичное изображение противотока метана и воздуха при проветривании

Еще одно явление естественной тяги, связанное с изменением плотности воздуха, наблюдается на горных предприятиях, ведущих горные работы на больших глубинах. Часть нагретого воздуха движется против движения основной воздушной струи.

Фактических методик прогноза величины естественной тяги нет. Имеющиеся способы расчёта основаны на эмпирических зависимостях, которые можно использовать только при наличии результатов натурных измерений температуры воздуха.

Ряд отечественных программ для расчёта воздухораспределения позволяют учесть депрессию естественной тяги при известных температурах в начале и конце ветви. Однако расчёт сложных явлений противотоков газовоздушных смесей они рассчитать не позволяют.

2.7. Расчёт параметров управления газовыделением

При проветривании угольных шахт применяют различные способы управления газовыделением. Управление газовыделением подразделяют на аэродинамический и газодинамический способы. Под первым понимают схемы и способы проветривания выемочных участков и режимы проветривания, под вторым – дегазацию и газоотсос.

В настоящее время дегазационное оборудование и газоотсасывающие установки не учитываются при проектировании вентиляции как источник дополнительной депрессии. По действующему Руководству, дегазация учитывается лишь в коэффициенте дегазации, при прогнозе газовыделения.

В настоящее время в России широко применяются сложные схемы с управлением газовыделением через выработанное пространство.

По рекомендациям [19] предлагается 9 схем с газоотводом через дренажные выработки, выработанное пространство и вентиляционные скважины. При этом определение параметров аэродинамического сопротивления учитывается эмпирическим средневзвешенным коэффициентом

крепости подработанного горного массива по шкале М.М. Протодяконова на расстоянии, равном восьми мощностям от вынимаемого пласта. В данной работе по экспериментальным данным предлагается определять удельное аэродинамическое сопротивление выработок, частично сохраняемых в выработанном пространстве, что крайне затруднительно, или рекомендуют ориентировочное значение – $0,007 \text{ даПа} \cdot \text{с}^2/\text{м}^7$. По инструкции [186] для расчётов требуется знать величины целого ряда трудноопределяемых коэффициентов, например, «коэффициент, учитывающий затраты мощности на перемещение комбайна; коэффициент отжима на поверхности забоя; коэффициент, учитывающий затупление резцов; коэффициент, учитывающий формы резцов на поверхности забоя; коэффициент уменьшения нагрузки в зависимости от длины геологического нарушения лавы; коэффициент готовности комбайна; коэффициент, характеризующий схему выемки угля; коэффициент, учитывающий метановыделение из эксплуатационных потерь угля в пределах выемочного участка (принимается по проекту); коэффициент, учитывающий расход воздуха или его утечки по поддерживаемой или погашаемой части воздухоподающей выработки в выработанном пространстве; коэффициент разрыхления пород кровли и др.» [186].

При этом совсем не учитывается то, что все параметры меняются во времени при ведении горных работ. Аэродинамическое сопротивление дренажных выработок, выработанного пространства – трудноопределяемые параметры и их нельзя заменить одним коэффициентом. Не учитывается взаимное влияние общешахтного проветривания и дегазации. Однако очевидно, что всегда присутствует аэродинамическая связь между рудничной атмосферой и выработанным пространством.

В горнодобывающих странах, как и в России активно, используют газодинамические методы управления газовыделением. При этом существенное внимание на государственном уровне уделено заблаговременной и предварительной дегазации. В США и Китае установлены строгие нормы по

величине относительной метанообильности, при которой разрешается вести подземную добычу угля.

При этом также используют системы с газоотсосом, но с существенным отличием. Сравнивая утверждённые по 30 CFR Section 75.334 схемы с газоотсосом в США (рисунок 2.39-2.40) [313] и рекомендуемые в России (рисунок 2.41-2.42) [186] видны отличия, касающиеся подготовки выемочных участков к отработке. Видно максимальное использование возможностей аэродинамического метода. Здесь каждый источник газового баланса выемочного участка имеет обособленное проветривание, к очистному забою подходит свежий воздух минимум по двум выработкам. При использовании многоштрековой подготовки появляется возможность сохранения газодренажной выработки на длительный период в хорошем состоянии, что позволяет более точно рассчитывать параметры газоотсоса и управлять проветриванием.

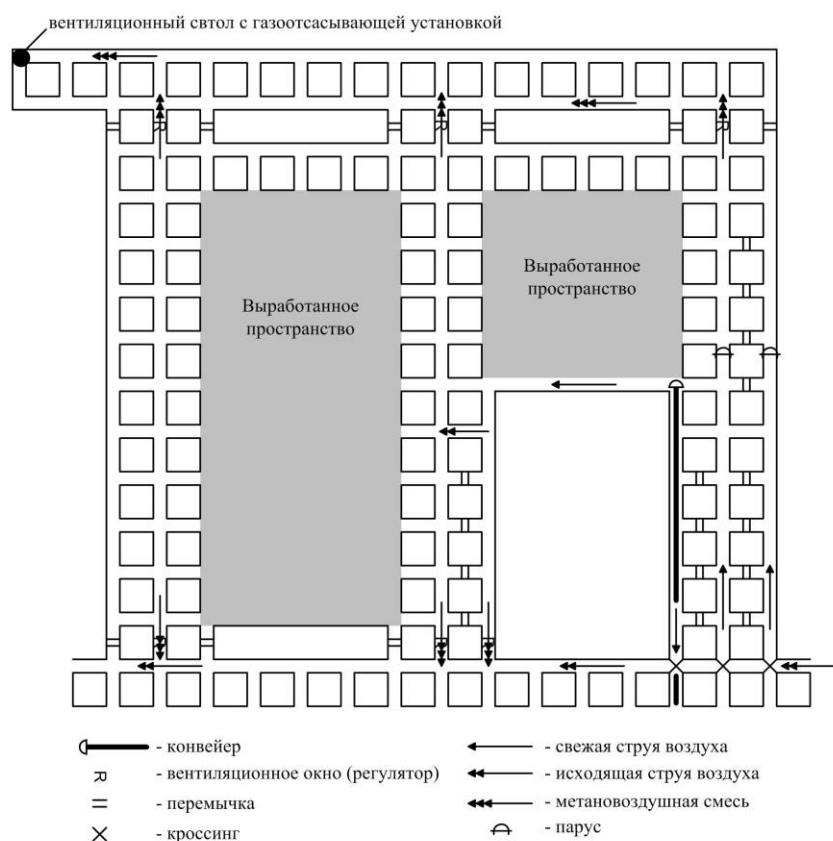


Рисунок 2.39 – Схема управления газовыделением с применением вентиляционного ствола (скважины) с газоотсасывающим вентилятором

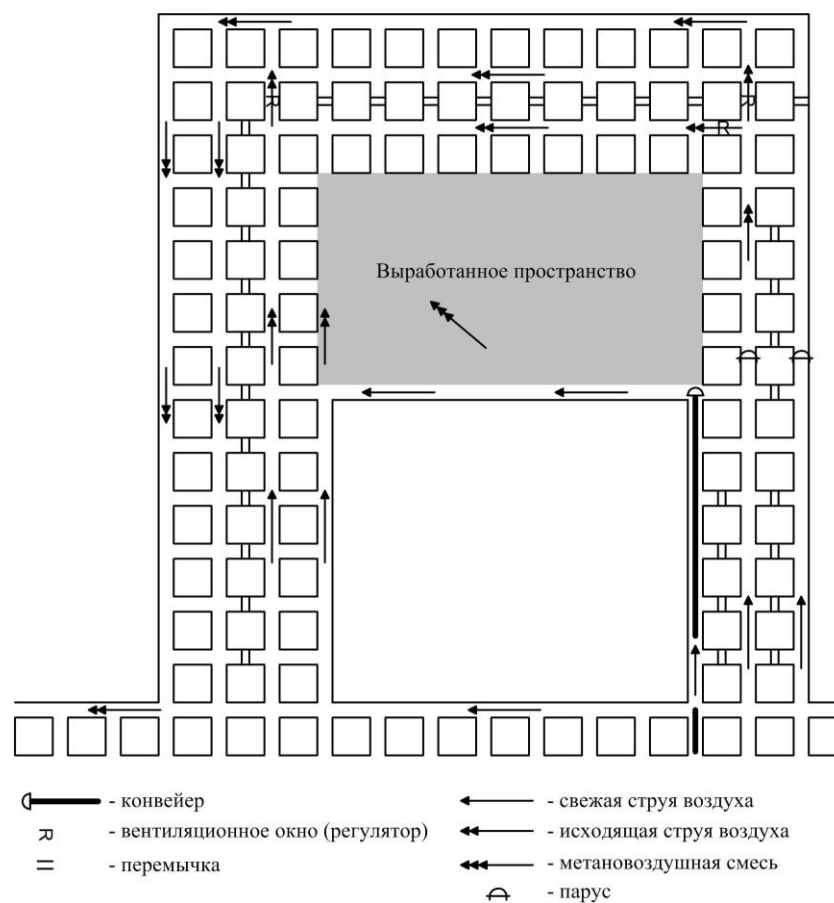


Рисунок 2.40 – Схема управления газовыделением с применением «кругового» проветривания

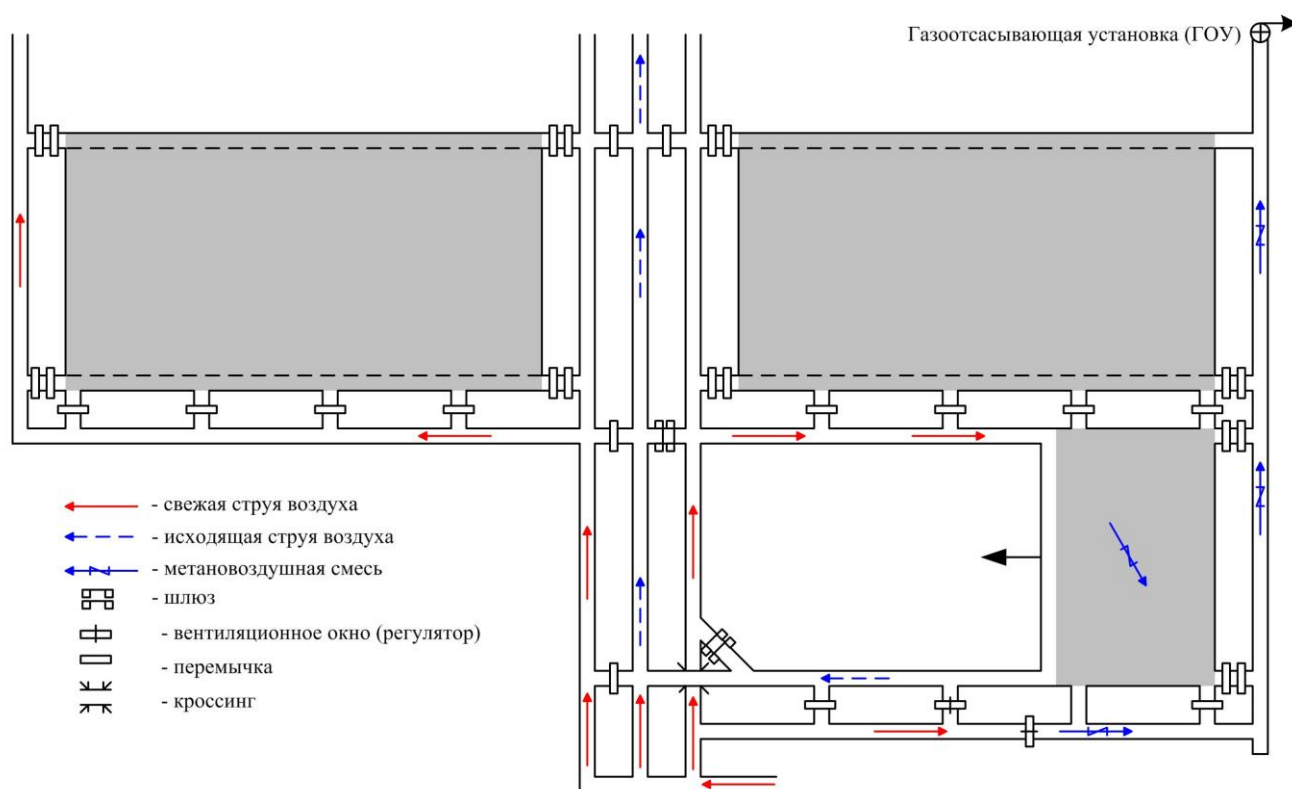


Рисунок 2.41 – Схема проветривания с применение ГОУ и дренажным выработкам [36]

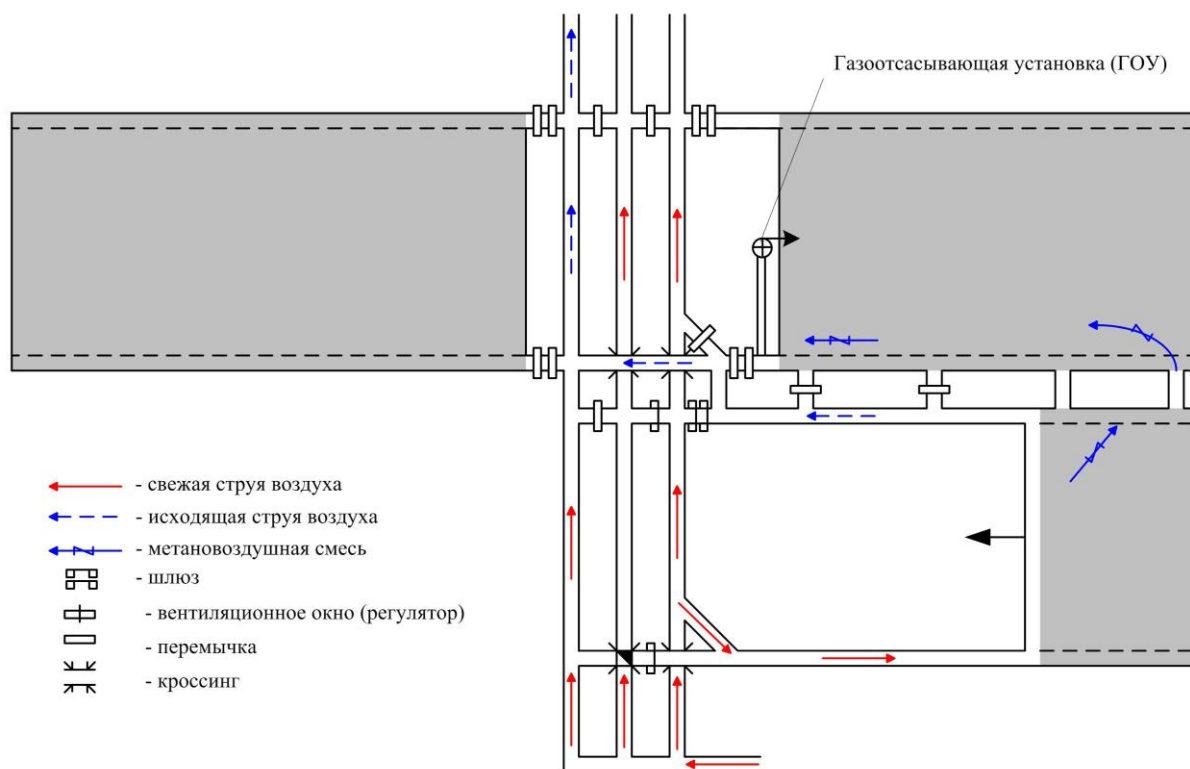


Рисунок 2.42 – Схема проветривания с применение ГОУ и вентиляционной скважины в смежной лаве [186]

Выводы

Во второй главе диссертационной работы проведён анализ применяемых методик расчёта параметров вентиляции горных предприятий. Рассмотрены физические процессы и явления, не учитываемые при проектировании вентиляции. Особое внимание уделено влиянию способа, схемы проветривания и особенностям при ведении горных работ в сложных горно-геологических, климатических условиях с учётом современного уровня развития технологий и применяемых средств проветривания и регулирования воздухораспределения при добыче полезных ископаемых, при строительстве и эксплуатации подземных сооружений.

В данной главе производится сравнение отечественных и зарубежных методик расчёта параметров проветривания. Сравняются применяемые схемы и способы проветривания горных предприятий, управления газовыделением, а также требования законодательства.

Анализ методик, используемых при проектировании проветривания, позволяет сделать следующие выводы:

1. В рассматриваемых методиках для описания сложных аэрогазотрёмодинамических процессов используют эмпирические зависимости или упрощённые формулы физических законов с допущениями, которые дают большую погрешность при использовании их в расчётах. Практически все зависимости получены для конкретных условий, однако часто используются для «аналогичных» или просто используются без упоминания о тех граничных условиях, в которых были получены.
2. Отсутствуют методики прогноза поступления вредных и опасных примесей в атмосферу горных выработок, соответствующие современным горно-геологическим и горнотехническим условиям.
3. Методики расчёта необходимого и достаточного количества воздуха по газам, образующимся в результате ведения взрывных работ, не учитывают тип взрывчатых веществ, свойство горных пород, в которых производится взрывание, свойство грунтовых вод, а также технологические особенности ведения взрывных работ.
4. Отсутствуют методики расчёта естественной тяги при проектировании вентиляции, тогда как в изменяющихся горно-геологических и технологических условиях влияние естественной тяги существенно, особенно для строящихся объектов.
5. Влияние термовлажностного режима на процесс проветривания действующими методиками проектирования не учитываются.
6. Отмеченные недостатки требуют создания нового подхода к разработке проектов вентиляции подземных объектов как при строительстве, так и при их эксплуатации.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Расчёт вентиляции шахт и рудников должен базироваться на принципах высшей математики. Высший математический анализ имеет главную цель количественное изучение непрерывных стохастических процессов, которое представляет собой математическое описание процессов диффузии, теплопереноса, внутреннего и внешнего трения в виде непрерывных аналитических функций. Эти формулы, должны отображать изменчивость характеристик процессов во времени и пространстве с учётом среды, в которой они протекают.

Необходимо правильно описать эти математические характеристики процессов проветривания, – общие законы количественных изменений, – на основе уравнений математической физики с учётом специфики условий горных выработок. Сложность математического описания процессов тепломассопереноса в шахтных вентиляционных сетях обусловлена большим числом разнородных факторов, влияющих как на процессы движения воздуха и выделения вредных веществ, так и на закономерности их переноса вентиляционными потоками.

В этом заключается смысл математического познания природы, так как всякое количественное изучение сводится к умению запечатлеть математическими символами общий закон, управляющий исследуемым явлением, с тем расчётом, что эта сконцентрированная математическая характеристика даст возможность раскрывать количественные условия течения процесса проветривания для любого его периода в каждой точке пространства.

Следовательно, основная задача работы – описать процесс проветривания шахт и рудников математическими зависимостями, учитывающими максимально возможное количество влияющих факторов.

Как отмечалось ранее, на сегодняшний момент большая часть расчётов по вентиляции производилась и производится по эмпирическим формулам, не

имеющим физического смысла, отображающим устойчивые статические связи между рядом взаимовлияющих факторов, в том диапазоне, для которого набирались статические данные. Использовать их для прогноза в условиях, отличающихся от тех в которых они были получены, неправомерно. Результаты прогноза газотепловыделений по этим зависимостям в современных условиях имеют высокую погрешность, что снижает уровень аэрологической безопасности, обеспечиваемый проектными решениями.

Принято считать, что рудничный воздух представляет собой смесь атмосферного воздуха, «мертвого» воздуха, активных газов, паров воды и пыли; причём при движении по горным выработкам и в выработанном пространстве состав его постоянно меняется.

В применяемой сегодня методологии проектирования вентиляции в качестве параметра, определяющего расход воздуха, принимается один наиболее значимый (весомый) фактор (газы, пыль, тепловыделения), тогда как в реальности в выработках выделяются различные вредные примеси, что влияет, в конечном счёте, на плотность воздуха и закономерности диффузии и теплопереноса.

Сегодня при расчётах вентиляции подземных объектов рассматривают рудничную атмосферу как некий объём с постоянной плотностью и влажностью. При этом не учитывать тот факт, что плотность воздуха существенно возрастает с глубиной и, уже начиная с 500 м, её изменение вносит серьёзные погрешности в результаты расчётов. Влажность воздуха также изменяется в значительных пределах по мере движения от начальной до конечной точки шахтной вентиляционной сети. Параметры газового состояния при математическом описании выше указанных процессов необходимо рассматривать в их взаимосвязи. Также для каждого подземного горного предприятия определяют преобладающие параметры рудничной атмосферы, относящиеся к вредным или опасным факторам, и в расчётах рассматривают только их, не принимая во внимание те, которые менее представлены в конкретном случае.

Описание процессов проветривания горных предприятий математическими закономерностями впервые предложено академиком А.А. Скочинским [219], где сообщается о существующих на тот период двух теориях движения газов. Первая теория основана на работах Навье-Стокса [340, 354], Г.Р. Кирхгоффа и др. [318], и в её основе лежит представление о том, что газ представлен материальными точками. На газ действуют не только внешние силы, но и внутренние, которые рассматриваются как внешние. Поэтому для них используют подход, применяемый в аналитической механике. Вторая теория только появилась на тот момент и не имела достаточно большой проработки. Основы второй теории впервые изложены Д.К. Максвеллом [329]. Она получила название кинетической теории.

Из-за сложности проведения интегрирования по кинетической теории, академик А.А. Скочинский подробно описывает теоретические процессы аэрогазодинамики горных предприятий по первой теории. При этом он отмечает о допущениях, которые применялись при разработке данной теории, и дополнительно вводит девять допущений. В заключении отмечает: 1) рассматриваемая им теория с большой погрешностью описывает изучаемые процессы; 2) теория, разработанная для несжимаемых жидкостей, плохо сходится даже с экспериментальными исследованиями для течения воды; 3) для исследования движения несовершенных (реальных) газов есть один путь – разделение всех процессов на «представляющие практический интерес» и «на группы, по сходству обстоятельств движения»; 4) для каждой такой группы целесообразно разрабатывать «полуматематические и полуэмпирические теории» с достаточной, с точки зрения практики, степенью точности [58].

При этом А.А. Скочинский дают чёткие рекомендации, как проводить исследования: «наиболее простой способ создания таких упрощённых теорий состоит в том, что предварительно исследуется, на основе выводов аналитической механики и теоретической физики, какой-либо частный случай движения, достаточно типичный для данной группы и настолько простой (идеальный), что исследование его не представляет особых затруднений, а

затем полученные таким путём зависимости обобщаются для всей группы, вводя эмпирические коэффициенты» [219].

Данная рекомендация характерна для большинства проводимых исследований в нашей стране в 20-м веке.

Сам академик Скочинский А.А. выводит основное уравнение рудничной аэродинамики (для идеального газа)

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho_0} + k_0 \cdot \frac{U_0^2}{2 \cdot g} = z_1 + k_1 \cdot \frac{U_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho_1} + h \quad (3.1)$$

или в общем виде

$$z_i + \frac{p_i}{\rho_i} + k_i \cdot \frac{U_i^2}{2 \cdot g} + h = const., \quad (3.2)$$

где k – коэффициент, зависящий от характера распределения скоростей в рассматриваемых сечениях; ρ – плотность воздуха, кг/м³; z – высота, м; U – скорость движения воздуха, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – потеря давления на преодоление трения, кг/м².

Данное уравнение, впервые получено Д. Бернулли для тяжёлой, несовершенной и несжимаемой жидкости. Сумму первых двух слагаемых уравнения (3.2) принято называть статическим напором, а третье слагаемое – динамическим (скоростным) напором.

Хотя неоднократно сообщалось о необходимости рассматривать совокупное влияние всех параметров, так как возможно при их взаимодействии происходит снижение или увеличение предельно допустимых норм и концентраций. В работе В.Н. Воронина [14] говорится, что «вопрос комбинированного действия вредных газов в шахтных условиях не может считаться решённым, в связи с этим некоторые результаты исследований общей токсикологии могут быть, по-видимому, с пользой перенесены и в рудничную вентиляционную практику» [14]. И далее приводятся исследования профессора Н.В. Лазарева [139] по расчёту токсичности и способу расчёта концентрации комбинированно действующих газов. К сожалению, эти исследования на практике получили незначительное применение.

Следует обратить внимание на работы профессора А.Т. Айруни [223] и профессора О.В. Скопинцевой [140, 215, 217] о снижении нижнего предела взрываемости метана при наличии в воздухе тяжелых углеводородов (этана, пропана, бутана и т.д.). На сегодняшний момент неизученным остаётся вопрос аэрогазодинамики тяжёлых углеводородов в условиях горных предприятий, а также вопрос о влиянии на газы углеводородной группы других газов, в том числе и взрывоопасных (угарного газа, водорода и т.д.). Для их изучения можно пойти по пути проведения натурных исследований в реальных условиях или на лабораторных моделях, но такие исследования не будут носить общего характера или закона, так как при данных исследованиях будет весьма сложно учесть взаимное влияние целого ряда факторов. Поэтому предлагается пойти по пути, на котором основано всё наше представление о природе – высшего математического анализа и кинетической теории газов [98].

Основываясь на двух этих соображениях, для всех типов подземных горных предприятий необходимо составить общее математическое описание процесса проветривания. Различия подземных горных предприятий по типам будут учитываться в дальнейшем при выборе граничных и начальных условий.

3.1. Общие принципы

Рудничная атмосфера представляет собой смесь газов, паров воды, аэрозолей, пыли, радиоактивных эманаций. При этом молекулы газов постоянно находятся в воздухе, а пыль и капли воды под действием силы тяжести и притяжения друг к другу, укрупняясь, оседают на почву, кровлю и борта горных выработок. Силы, затрачиваемые для перевода осевшей пыли во взвешенное состояние, весьма существенны и специфичны (движение людей и техники) в данной работе не рассматриваются, так как относятся к локальным источникам. При этом сдувание с неровностей и поверхностей оборудования также не рассматривается. Вода в виде отдельных молекул ведёт себя точно так

же как и газы и в этом состоянии характеризуется как влажность рудничной атмосферы.

При проветривании идут процессы изменения давления, диффузии, перемешивания, вытеснения, внутреннего трения, а также тепловые процессы.

Перепад давления является основной движущей силой при проветривании. Примем гипотезу, что движение воздуха при проветривании есть следствие выравнивания количества молекул в единице объёма. Основанием для этого служит тот факт, что скорость молекул в составе рудничной атмосферы в сотни раз выше максимально допустимой скорости движения воздуха в рудничной атмосфере (таблица 3.1). То есть внутримолекулярное движение более интенсивно, нежели процесс проветривания горных выработок. При этом процесс диффузии и выравнивания температуры не происходит мгновенно, поэтому, например, могут образовываться скопления газов и радиоактивных частиц.

Таблица 3.1 – Молекулярные скорости некоторых газов

Название газа	Среднеарифметическая молекулярная скорость, м/с
Атмосферный воздух	485
Кислород	461
Азот	492
Углекислый газ	392
Сероводород	444
Водород	1843

Вторым подтверждением гипотезы является основной закон теоретической химии Авогадро (Avogadro), сообщающий, что различные газы содержат при одинаковой температуре и давлении одинаковое число молекул в равных объёмах. С ростом давления увеличивается количество молекул, содержащихся в единице объёма. Это приводит к ограничению в применении ранее вводимого при проектировании вентиляции горных предприятий допущения о неизменяемой плотности воздуха.

Так, например, увеличение давления в локальном месте приводит к увеличению плотности воздуха за счёт механической работы вентиляционного оборудования, что схематично показано на рисунке 3.1.

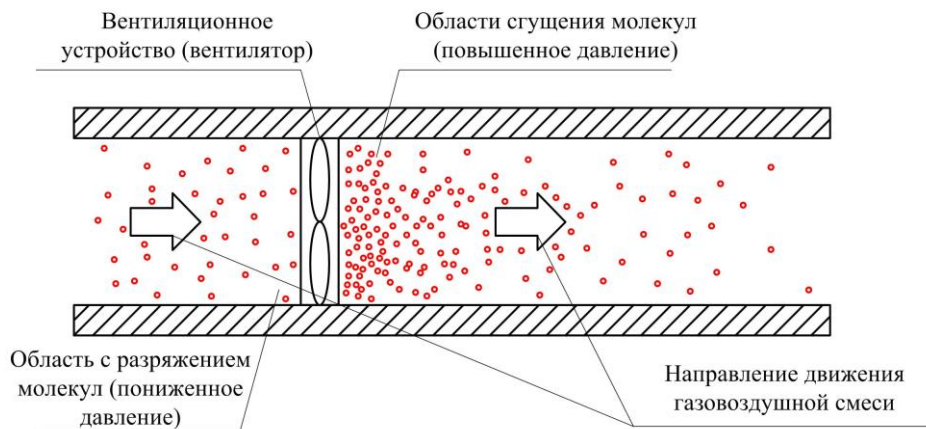


Рисунок 3.1 – Движение потока газовой смеси по гипотезе выравнивания количества молекул

По той же гипотезе происходят явления естественной тяги. За счёт изменения плотности и ограниченного временем диффузии газов происходит разделение потока на объёмы с разными свойствами. Более легкие газы (с меньшим размером и массой молекул, с разными молекулярными скоростями и длинами свободного пробега молекул, с разными силами внутримолекулярного притяжения) вытесняются вверх, а более тяжелые – вниз, и, наоборот, для тяжёлых газов.

3.2. Аэродинамическое трение

У поверхности твердого тела (борта, почва, кровля выработки, крепь, стационарное горное оборудование и т.п.), вдоль которого движется газоздушная смесь, или у тел, движущихся в рудничной атмосфере (электровозы, самоходная горная техника и т.п.), есть некоторая замедляющая движение тангенциальная сила – внешнее трение.

Явление это объясняется на основании гипотезы молекулярного движения следующим образом: молекулы движущейся газовой смеси, ударяясь о неровную поверхность твёрдого тела, находящегося в покое, теряют некоторую часть скорости своего общего поступательного движения. Иногда получают вместо поступательного общего направления перемещения количества молекул скорость в обратном направлении. Поэтому поступательное движение газовой смеси постоянно ослабевает. Если, наоборот, твёрдое тело движется в покоящейся газовой среде, то ударяющиеся об его неровную поверхность молекулы получают импульс в сторону его движения, из-за чего уменьшается скорость движения твёрдого тела. Если твёрдое тело движется быстрее основного газовой потока, то тогда происходит ускорение обоих. И если твёрдое тело движется против потока газовой смеси, то, соответственно, происходит торможение обоих.

При внешнем трении у поверхности за счёт торможения и получение импульса, направленного против движения основного потока, происходит увеличение количества молекул. Как следствие растёт плотность воздуха.

Местные аэродинамические сопротивления в виде поворотов в данном случае рассматриваются как частное, более укрупнённое внешнее сопротивление.

Математическое описание внешнего трения в общем случае дано О.Е. Мейером. Трение о шероховатую поверхность замедляет движение соседних с ней газовых слоёв, далее действием внутреннего трения это замедление сообщается слоям более отдалённым. Таким образом, отдельные слои газа имеют различные скорости поступательного движения, при этом они имеют некоторую среднюю скорость u . Данное предположение хорошо согласуется с результатами натурных исследований эпюр скоростей движения воздуха в горных выработках, полученными различными авторами.

В единицу поверхности твёрдого тела ударяется в течение единицы времени количество молекул

$$N_{\text{м}}^{\text{ср}} = \frac{1}{4} \cdot N \cdot \Omega, \quad (3.3)$$

где N – число молекул в единице объёма; Ω – среднеарифметическая молекулярная скорость в покое газе.

Каждая из них обладает до столкновения о поверхность количеством общего поступательного движения, равным $m \cdot u$. Удар о твёрдую поверхность приводит к тому, что молекула теряет часть этого количества движения или даже получает вместо него количество движения с обратным знаком, которое может иногда равняться $m \cdot u$ по абсолютной величине. Каждая ударяющаяся в твёрдую поверхность молекула теряет в среднем количество общего поступательного движения

$$Q_{\text{ср}} = \beta \cdot m \cdot u, \quad (3.4)$$

где β – постоянный для данной твёрдой поверхности коэффициент, величина которого должна лежать между 0 и 2; m – масса молекулы; u – скорость молекулы.

Итак, на протяжении единицы рассматриваемой поверхности происходит в единицу времени уменьшение количества общего поступательного движения, равное

$$\frac{1}{4} \cdot N \cdot \Omega \cdot \beta \cdot m \cdot u = \frac{1}{4} \cdot \Omega \cdot \beta \cdot \rho \cdot u, \quad (3.5)$$

где ρ – плотность газа.

Это и есть величина внешнего трения. Величина, равная

$$\delta = \frac{1}{4} \cdot \Omega \cdot \beta \cdot \rho, \quad (3.6)$$

является коэффициентом внешнего трения.

Как видно из формул, он зависит от количества молекул и их физических свойств (среднеарифметической скорости и массы молекул), а также от шероховатости поверхности. Опыты А. Kundt'а и Е. Warburg'а [285] показали, что величина β зависит только от типа твёрдой поверхности.

Первая математическая теория внутреннего трения газов принадлежит Д.К. Максвеллу [330], впоследствии она была развита в работах О.Е. Meyer'а, А. Kundt'а и Е. Warburg'а.

Для исследуемого нами случая движения газовой смеси, в которой кроме теплового движения молекул есть поступательное движение, выведем уравнение внутреннего трения. В общем случае поступательное движение есть по всей горной выработке и в одном направлении, но скорость меняется при переходе от одной точки к другой непрерывно и постепенно. Выберем неподвижную систему координат, так чтобы ось OY была параллельна направлению поступательного движения газовой смеси, и возьмём при точке (x, y, z) площадку $d\sigma$, расположенную к оси OY параллельно. Необходимо определить взаимное трение газовых масс, разделённых этой площадкой.

Возьмём любую точку на элементе $d\sigma$ за начало полярных координат r, ν, φ с осью, перпендикулярно площадке. Из элемента $r^2 \sin \nu \, dr \, d\nu \, d\varphi$, взятого при точке (r, ν, φ) , выходит в единицу времени R молекул

$$R = N \cdot \frac{u}{L} \cdot e^{-\frac{r}{L}} \cdot r^2 \cdot \sin \nu \cdot dr \, d\nu \, d\varphi, \quad (3.7)$$

где L – расстояние от одной молекулы до другой в покое газе.

Эти молекулы проходят путь больший, чем r ; из них $R \cdot s$ молекул проходят через площадку $d\sigma$. Тогда

$$\frac{s}{R} = \frac{d\sigma \cdot \cos \nu}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (3.8)$$

а отсюда

$$s = \frac{1}{4 \cdot \pi} N \cdot \frac{u}{L} \cdot e^{-\frac{r}{L}} \cdot \cos \nu \cdot \sin \nu \cdot dr \, d\nu \, d\varphi. \quad (3.9)$$

Внутреннее трение часто встречается в рудничной аэрологии не только при явлениях естественной тяги, но и в вентиляционных струях при наличии зон с ламинарным движением или стратификации газов, имеющих плотность отличную от плотности воздуха имеющимися скоплениями газов.

Пусть u и u' будут скорости поступательного движения газовой смеси соответственно близ элемента $d\sigma$ и в точке (r, ν, φ) . Каждая из s молекул, выходящих из $r^2 \sin \nu \, dr \, d\nu \, d\varphi$ и проходящих через $d\sigma$ в другую часть

газовоздушной среды, сообщает этой последней импульс $m u'$, а все вместе взятые молекулы сообщают импульс, равный

$$I = \frac{m}{4 \cdot \pi} N \cdot \frac{u}{L} \cdot u' \cdot e^{-\frac{r}{L}} \cdot \cos \nu \cdot \sin \nu \cdot dr d\nu d\varphi. \quad (3.10)$$

Плоскость, в которой лежит площадка $d\sigma$, разделяет газовую среду на две части. Ту из них, которая соответствует меньшему значению x , назовём первой, а соответствующую большему значению x – второй. Угол ν мы будем считать острым, это значит, что положение точек второй части газовой среды мы будем относить к системе полярных координат с осью, направленной по положительному направлению оси OX (направленных перпендикулярно площадке $d\sigma$), а по отношению к точкам первой части будем пользоваться системой координат с противоположно направленной осью. Угол φ считается от положительного направления оси OY в той и другой системе полярных координат.

Обозначим через Q_1 полное количество поступательного движения, приобретаемого в единицу времени через площадку $d\sigma$ первой частью газовой смеси. Аналогичное количество для второй части назовём Q_2 . Количество Q_1 приобретается, а Q_2 теряется первой частью газовой среды, поэтому величина внутреннего трения, претерпеваемого этой частью на протяжении элемента $d\sigma$, будет равно

$$F \cdot d\sigma = Q_1 - Q_2. \quad (3.11)$$

Трение, претерпеваемое второй частью на протяжении участка того же элемента, выразится через

$$-F \cdot d\sigma = Q_2 - Q_1. \quad (3.12)$$

Так как u есть непрерывная функция координат, можно предположить, что

$$u' = u \pm \frac{\partial u}{\partial x} \cdot r \cdot \cos \nu + \frac{\partial u}{\partial y} \cdot r \cdot \cos \nu \sin \varphi + \frac{\partial u}{\partial z} \cdot r \cdot \sin \nu \sin \varphi + \dots \quad (3.13)$$

Знак «+» надо ставить для точек второй части газовой среды, а знак «-» – для точек первой части газовой среды. Проинтегрировав

выражение (3.10) по r , v , φ в пределах первой части газовой среды, получим Q_2 . Интеграция того же выражения в пределах второй части даёт Q_1

$$Q_1 = d\sigma \frac{m}{4 \cdot \pi} N \cdot \frac{u}{L} \int_0^{2\pi} d\varphi \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} dv \cdot \int_0^\infty dr \cdot e^{-\frac{r}{L}} \cdot u'_2 \cos v \cdot \sin v \quad (3.14)$$

и

$$Q_2 = d\sigma \frac{m}{4 \cdot \pi} N \cdot \frac{u}{L} \int_0^{2\pi} d\varphi \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} dv \cdot \int_0^\infty dr \cdot e^{-\frac{r}{L}} \cdot u'_1 \cos v \cdot \sin v, \quad (3.15)$$

где u'_1 и u'_2 соответствуют значениям u' соответственно для первой и второй частей газовой среды. Приняв во внимание формулу (3.13) после выполнения интегрирования, получим

$$Q_1 = d\sigma \frac{m}{2} N \cdot \frac{u}{L} \cdot \left[\frac{L}{2} u + \frac{L^2}{3} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{L^3}{4} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \dots \right] \quad (3.16)$$

и

$$Q_2 = d\sigma \frac{m}{2} N \cdot \frac{u}{L} \cdot \left[\frac{L}{2} u - \frac{L^2}{3} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{L^3}{4} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \dots \right]. \quad (3.17)$$

А отсюда, с учётом формулы (9)

$$F \cdot d\sigma = d\sigma \cdot m \cdot N \cdot \frac{u}{L} \cdot \left[\frac{L^2}{3} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{L^4}{5} \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \dots \right]. \quad (3.18)$$

Так как L совсем маленькая величина, то можно ограничиться первым членом разложения, что приведёт нас к формуле

$$F = \frac{1}{3} m \cdot N \cdot u \cdot L \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (3.19)$$

С учётом гипотезы Ньютона, что трение прямо пропорционально разности скоростей соседних слоёв, то есть выражается формулой

$$F = \eta \cdot \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (3.20)$$

где η – некоторый постоянный фактор, зависящий от свойств газовой среды, называемый коэффициентом внутреннего трения,

получим формулу для определения постоянного коэффициент внутреннего трения для газов

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot m \cdot N \cdot u \cdot L = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot u \cdot L. \quad (3.21)$$

Отдельно остаётся вопрос влияния температуры на коэффициент внутреннего трения. По данному вопросу точного математического описания влияния температуры нет. Температура может влиять на среднюю длину молекулярных путей в рассматриваемом газе (L) и на среднеарифметическую молекулярную скорость (Ω). Среднеарифметическая молекулярная скорость прямо пропорциональна квадратному корню из температуры, а L возрастает с температурой за счёт увеличения импульса соударяющихся молекул в газовой среде. По опытам Obermayer'a [342] можно получить добавочное значение к коэффициенту внутреннего трения

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)^n, \quad (3.22)$$

где η_0 – коэффициент внутреннего трения без учёта температуры для данного газа; t – температура газа; n – дробь $\frac{3}{4}$ для постоянных газов, и близкая к 1 – для легкосжимаемых в жидкое состояние газов.

Отношение среднеарифметической молекулярной скорости к средней длине пути свободного пробега молекул в рассматриваемом газе равно среднему числу столкновений молекул в единицу времени (C). Некоторые значения параметров газов приведены в таблице 3.2.

3.3. Теплоперенос в рудничной атмосфере

Температура газовой среды с точки зрения кинетической теории есть не что иное, как движение газовых молекул и атомов в пространстве. Явление теплопроводности с точки зрения рассматриваемой гипотезы объясняется переносом движущимися молекулами внутренней энергии с одного места на другое. При этом часть газовой среды имеющая большую температуру отдаёт её другой части с меньшей температурой.

Таблица 3.2 – Некоторые значения параметров газов (при температуре 20 °С и давлении 760 мм рт. ст.)

Название газа	Средняя длина молекулярных путей в рассматриваемом газе, L, м	Среднее число столкновений в единицу времени, C, 10^6	Коэффициент внутреннего трения, η
Атмосферный воздух	0,0000000950	4700	$0,0001678 \cdot (1+0,003665 \cdot t)^{0,76}$
Кислород	0,0000001059	4065	$0,0001878 \cdot (1+0,003665 \cdot t)^{0,80}$
Азот	0,0000000986	4760	$0,0001559 \cdot (1+0,003665 \cdot t)^{0,74}$
Углекислый газ	0,0000000680	5510	$0,0001383 \cdot (1+0,003701 \cdot t)^{0,94}$
Угарный газ	0,0000000985	4780	$0,0001625 \cdot (1+0,003665 \cdot t)^{0,74}$
Водород	0,0000001855	9480	$0,0000861 \cdot (1+0,003665 \cdot t)^{0,70}$

Первое, наиболее полное математическое описание процесса теплообмена в газовой среде, было дано Р. Клаузиусом [358]. В своей теории он вводит допущение и не учитывает различные состояния молекул, обусловленные неправильностью теплового движения. По его мнению, различие в состоянии движения молекул происходит только от неравномерного распределения температуры в воздухе.

Вторая теория теплопроводности предложена О.Е. Мейером [281], в основе которой лежат следующие положения: в любом месте воздушной среды молекулы движутся безразлично относительно направлений; распределение скоростей движения молекул происходит по закону Д.К. Максвелла; средняя молекулярная скорость изменяется с местом в зависимости от температуры. Обе теории дополняют друг друга, поэтому их объединение даст наиболее полное представление о процессе теплопереноса в воздухе, что было сделано Б.В. Станкевичем.

В рассматриваемых теориях под теплопроводностью понимают переносимую в единицу времени через единицу площади энергию (G). В общем случае она равна [336]

$$G = \frac{1}{4} \xi \cdot N \cdot J \cdot \overline{V^3} \mu \cdot d\mu, \quad (3.23)$$

где V – среднеарифметическое значение скоростей молекул; μ – косинус угла, образованного направлением вектора скорости молекулы с осью; J – механический эквивалент теплоты; N – количество молекул.

$$\xi = \frac{2}{3} \frac{c_v}{c_p - c_v}, \quad (3.24)$$

где c_v, c_p – теплоёмкость газа при постоянном объеме и давлении, соответственно.

С учётом обобщённой теории Б.В. Станкевича теплопроводность в калориях будет определяться по зависимости

$$\frac{G}{J} = -K \frac{dT}{dx} = -\frac{160}{9\pi^2 0,318} ((3+\nu) \cdot a + b) c_v \eta \frac{dT}{dx}, \quad (3.25)$$

где K – коэффициент теплопроводности, a, b – константы, получаемые опытным путём для каждого газа.

$$K = 5,664((3+\nu) \cdot a + b) c_v \eta. \quad (3.26)$$

Числовые значения коэффициента теплопроводности некоторых газов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Некоторые значения коэффициента теплопроводности (при температуре 20 °С и давлении 760 мм рт. ст.)

Название газа	Коэффициент теплопроводности, K
Атмосферный воздух	$1,670 c_v \eta$
Кислород	$1,677 c_v \eta$
Азот	$1,667 c_v \eta$
Углекислый газ	$1,701 c_v \eta$
Угарный газ	$1,667 c_v \eta$
Водород	$1,660 c_v \eta$

Из представленной зависимости видно, что коэффициент теплопроводности не зависит от плотности газа. Также необходимо обратить внимание, коэффициент теплопроводности изменяется по тому же закону, что и коэффициент внутреннего трения.

3.4. Диффузия газов рудничной атмосферы

Для проветривания горных выработок часто используется явление диффузии газов. Правилами безопасности определено, что тупиковые горные

выработки, длиной менее 10 м, проветриваются за счёт диффузии газов. Обоснование выбора длины в 10 метров в литературе не встречается.

Первым, разработавшим теорию диффузии газов, был Д.К. Максвелл [327] экспериментальные исследования по данному явлению были проведены И.Й. Лошмидтом [322].

О.Е. Мейер [336], пренебрегая поступательным движением газовой среды, принял, что процесс диффузии происходит из-за неравномерного распределения молекул одного и другого газов в пространстве. Постепенно за счёт теплового молекулярного движения происходит выравнивание распределения молекул в пространстве. В его представлении закон диффузии газов выглядит так

$$D = \frac{\pi \cdot \Omega_{H_2}}{8 \cdot N} \cdot \left(\frac{1}{\varsigma_1} + \frac{1}{\varsigma_2} \right), \quad (3.27)$$

где Ω_{H_2} – среднеарифметическая молекулярная скорость водорода;

и

$$\varsigma_1 = \frac{m_1}{\sqrt{m_{H_2}}} \cdot \left(\pi \cdot \psi_1^2 \sqrt{\frac{2}{m_1}} + \pi \cdot \psi_{12}^2 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}} \right), \quad (3.28)$$

$$\varsigma_2 = \frac{m_2}{\sqrt{m_{H_2}}} \cdot \left(\pi \cdot \psi_2^2 \sqrt{\frac{2}{m_2}} + \pi \cdot \psi_{12}^2 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}} \right). \quad (3.29)$$

Данные формулы выведены с учётом незначительных скоростей поступательного движения газовой смеси. В условиях ведения горных работ скорости поступательного движения могут быть различны и зависят они от скорости движения воздуха в сквозных горных выработках (в среднем от 0,1 до 18 м/с по Правилам безопасности), к которым примыкает тупиковая выработка.

Примем за основу теорию диффузии газов, предложенную Д. Стефаном [352]. Давление диффундирующих газов p_1 и p_2 определяется как функция времени T и абсциссы x , следующими уравнениями

$$\frac{\partial p_1}{\partial T} = D \cdot \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} \quad (3.30)$$

и

$$\frac{\partial p_2}{\partial T} = D \cdot \frac{\partial^2 p_2}{\partial x^2}, \quad (3.31)$$

где

$$D = A_{12} \cdot \frac{p_0^2}{d_1 \cdot d_2} \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{p}, \quad (3.31)$$

где A_{12} – некоторый постоянный коэффициент, зависящий от природы газов; d_1 и d_2 – значения плотности газов при нормальных давлениях p_0 и абсолютной температуре t_0 ; t – абсолютная температура обоих газов; p – сумма давлений газов p_1 и p_2 , имеющая одну и ту же величину.

В следующей своей работе Д. Стефан определяет коэффициент A_{12} , выводя его через сопротивление W , которое испытывает масса одного газа, заключенного в элементе объёма $d\tau$, при своём движении через другой газ. По его гипотезе сопротивление пропорционально скорости поступательного движения одного газа относительно другого

$$W_x = -A_{12} \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (a_1 - a_2) \cdot d\tau, \quad (3.29)$$

где a_1 и a_2 – слагающие скорости рассматриваемых газов по направлению оси OX ; ρ_1 и ρ_2 – значения плотности газов.

С точки зрения кинетической теории газов, это сопротивление равно потере некоторого количества поступательного движения молекулами одного газа при столкновении их с молекулами другого газа. Данное столкновение происходит по законам столкновения упругих шаров, при этом молекула после соударения теряет по направлению OX количество движения

$$m_1 \cdot u_1 - m_1 \cdot \bar{U}_1 = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (u_1 - u_2), \quad (3.33)$$

где u_1 и u_2 – скорости молекул до соударения; m_1 и m_2 – масса молекул; \bar{U}_1 – средняя скорость молекулы после соударения.

В рассматриваемом месте диффузной трубки автор рассматривает процесс следующим образом. Пусть на единицу объёма n_1 – молекулы первого газа имеют слагающие скорости $\xi_1 + a_1$, ζ_1 , η_1 , и n_2 – молекулы второго газа имеют слагающие скорости $\xi_2 + a_2$, ζ_2 , η_2 . Под скоростями ζ_1 , η_1 , ζ_2 , η_2

подразумевают скорость, безразличную относительно направлений молекулярного движения. Поступательное движение происходит вдоль оси OX .

Молекулы первого газа сталкиваются с рассматриваемыми молекулами второго газа в элементе объёма $d\tau$ в единицу времени в количестве J раз

$$J = \pi \cdot \psi_{12}^2 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot B' \cdot d\tau, \quad (3.34)$$

где B' – скорость молекул одной группы, относительно молекул другой группы, равная

$$B' = \sqrt{(\xi_1 - \xi_2 + a_1 - a_2)^2 + (\zeta_1 - \zeta_2)^2 + (\eta_1 - \eta_2)^2}. \quad (3.35)$$

При каждом таком столкновении молекула первого газа теряет среднее число, оцениваемое по направлению количества движения (из уравнения (3.33))

$$M = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} (\xi_1 - \xi_2 + a_1 - a_2). \quad (3.36)$$

С учётом всех столкновений молекул первого газа теряется общее количество движения, равное

$$J \cdot M = \pi \cdot \psi_{12}^2 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot B \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} (\xi_1 - \xi_2 + a_1 - a_2) \cdot d\tau. \quad (3.37)$$

Суммируя все значения полученного выражения, соответствующие возможным $\xi_1, \zeta_1, \eta_1, \xi_2, \zeta_2, \eta_2$, получим величину

$$-W_x = \pi \cdot \psi_{12}^2 \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot d\tau \sum n_1 \cdot n_2 \cdot B' \cdot (\xi_1 - \xi_2 + a_1 - a_2). \quad (3.38)$$

Так как относительная скорость поступательного движения рассматриваемых газов $(a_1 + a_2)$ мала по сравнению с молекулярным движением, можно предположить

$$B' = B + \frac{\xi_1 - \xi_2}{B} \cdot (a_1 - a_2), \quad (3.39)$$

где

$$B = \sqrt{(\xi_1 - \xi_2)^2 + (\zeta_1 - \zeta_2)^2 + (\eta_1 - \eta_2)^2}. \quad (3.40)$$

Тогда уравнение (3.35) с учётом отбрасывания членов, содержащих $(a_1 + a_2)$ во второй и высших степенях, переписывается

$$W_x = -\pi \cdot \psi_{12}^2 \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot d\tau \sum n_1 \cdot n_2 \cdot B \cdot \left(\xi_1 - \xi_2 + a_1 - a_2 + \frac{(\xi_1 - \xi_2)^2}{B^2} \cdot (a_1 - a_2) \right). \quad (3.41)$$

Так как слагающие скоростей ξ , ζ , η безразличны относительно направлений молекулярного движения, то

$$\sum n_1 \cdot n_2 \cdot B \cdot (\xi_1 - \xi_2) = 0, \quad (3.42)$$

$$\sum \frac{n_1 \cdot n_2}{B} \cdot (\xi_1 - \xi_2)^2 = \sum \frac{n_1 \cdot n_2}{B} \cdot (\zeta_1 - \zeta_2)^2 = \sum \frac{n_1 \cdot n_2}{B} \cdot (\eta_1 - \eta_2)^2 = \frac{1}{3} \sum n_1 \cdot n_2 \cdot B. \quad (3.43)$$

Следовательно,

$$W_x = -\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \psi_{12}^2 \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (a_1 - a_2) \cdot d\tau \sum n_1 \cdot n_2 \cdot B \quad (3.44)$$

или

$$W_x = -\frac{4}{3} \cdot C'_{12} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (a_1 - a_2) \cdot d\tau, \quad (3.45)$$

где C'_{12} – число столкновений, происходящих в единицу времени в единице объёма между разнородными молекулами

$$C'_{12} = \pi \cdot \psi_{12}^2 \cdot \sum n_1 \cdot n_2 \cdot B = \pi \cdot \psi_{12}^2 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}. \quad (3.46)$$

Тогда,

$$W_x = -\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \psi_{12}^2 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \frac{\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}}{m_1 + m_2} \cdot (a_1 - a_2) \cdot d\tau. \quad (3.47)$$

Отсюда постоянная A_{12} выражается

$$A_{12} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \psi_{12}^2 \cdot \frac{\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}}{m_1 + m_2}, \quad (3.48)$$

подставив данное выражение в формулу (3.31), будем иметь

$$D = \frac{3}{4 \cdot \pi \cdot \psi_{12}^2} \cdot \frac{\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}}{m_1 + m_2} \cdot \frac{p_0^2}{d_1 \cdot d_2} \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{p}. \quad (3.49)$$

Из данного уравнения следует, что коэффициент диффузии обратно пропорционален полному давлению и прямо пропорционален квадрату абсолютной температуры. Данный факт не используется для определения эффективности проветривания горных выработок, хотя, очевидно, на больших глубинах ведения горных работ данные параметры рудничной атмосферы будут существенно влиять на процесс проветривания.

Данное уравнение наиболее полно позволяет учесть различные факторы, влияющие на диффузию газов в рудничной атмосфере. Согласно данному представлению, процесс диффузии газов зависит от параметров газовой среды (физических параметров молекул, давления и температуры). Очевидно, что теория диффузии двух газов распространяется на сколь угодно большое количество газов. Это позволяет учесть многокомпонентные смеси, присутствующие в рудничной атмосфере.

3.5. Уравнение движения газовой среды

При исследовании внутреннего и внешнего трения, теплопроводности и диффузии мы принимали состояние рассматриваемых газовой смесей постоянным, не изменяющимся во времени.

Рассмотрим газовую среду из одинаковых молекул, находящуюся в движении при действии любых внешних сил. Пусть будут слагающие скорости любой молекулы равны u_1, v_1, w_1 по направлению трёх взаимно перпендикулярных неподвижных осей. Предположим,

$$u_1 = a + \xi, v_1 = b + \eta, w_1 = c + \zeta, \quad (3.50)$$

где a, b, c – слагающие скорости центра тяжести всех молекул, находящихся в данный момент в одном элементе объёма с рассматриваемой молекулой; ξ, η, ζ – слагающие скорости рассматриваемой молекулы относительно общего центра тяжести.

Величины a, b, c , как и средние величины различных функций ξ, η, ζ для всего элемента объёма, рассматриваем как функции координат x, y, z и времени t .

Число молекул, находящихся в данном месте в данный момент времени на единицу объёма, равно N . Пусть между этими молекулами есть такие dN , у которых слагающие скорости ξ, η, ζ лежат между пределами

$$\xi \text{ и } \xi + d\xi, \eta \text{ и } \eta + d\eta, \zeta \text{ и } \zeta + d\zeta. \quad (3.51)$$

Представим перпендикулярную к оси Ox плоскость, движущуюся в пространстве со скоростью, слагающая которой по направлению оси Ox есть

a' , и рассмотрим на ней элементарную площадку $d\sigma$. Параллельная оси ОХ слагающая скорости этой площадки относительно молекул, имеющих слагающие скорости $a + \xi$, $b + \eta$, $c + \zeta$, будет равна

$$a' - (a + \xi). \quad (3.52)$$

Тогда в течение времени dt площадка $d\sigma$ встречает с положительной стороны число молекул, равное

$$[a' - (a + \xi)]dt d\sigma dN, \quad (3.53)$$

для которых ξ , η , ζ лежат между пределами (46). Число молекул, пролетающих в течение времени через площадку с отрицательной на положительную сторону, будет равно

$$[a + \xi - a']dt d\sigma dN. \quad (3.54)$$

Пусть будет Q – некоторая функция слагающих u_1 , v_1 , w_1 . Сумма количеств Q , перенесённых движущимися молекулами в течение dt сквозь площадку $d\sigma$ в положительном направлении, выразится

$$[a' - a]dt d\sigma \int Q dN + dt d\sigma \int \xi Q dN. \quad (3.55)$$

Обозначая через

$$\overline{F(\xi, \eta, \zeta)}, \quad (3.56)$$

среднюю величину любой функции $F(\xi, \eta, \zeta)$ для всех молекул в элементе объёма и количество, определяемое формулой (3.55), к единице времени и площади, получаем выражение

$$(a - a')\overline{Q}N + \overline{\xi Q}N. \quad (3.57)$$

Приняв в формуле (3.57) \overline{Q} , равным $m(a + \xi)$, $m(b + \eta)$, $m(c + \zeta)$ (где m – масса молекулы), получим выражения для слагающих по осям ОХ, ОУ, ОZ импульсы, сообщаемые в единицу времени той части газовой среды, которая находится по положительную сторону движущейся плоскости, на протяжении единицы площади. Эти выражения можно записать в следующем виде

$$(a - a') \cdot a \cdot m \cdot N + \overline{\xi^2} \cdot m \cdot N, \quad (3.58)$$

$$(a - a') \cdot b \cdot m \cdot N + \overline{\xi \cdot \eta} \cdot m \cdot N, \quad (3.59)$$

$$(a - a') \cdot c \cdot m \cdot N + \overline{\xi \cdot \zeta} \cdot m \cdot N. \quad (3.60)$$

Далее, следуя по методу Д.К. Максвелла, выведем уравнение движения газов. Эти закономерности, основанные на кинетической теории газов, в дальнейшем лягут в основу системы уравнений, описывающих процессы проветривания рудничной атмосферы. Выделим мысленно в пространстве, занятом газом, параллелепипед $dx \, dy \, dz$, движущийся поступательно со скоростью, слагающие которой равны a' , b' , c' . Величина $N \cdot \bar{Q}$, относящаяся к молекулам, которые находятся в рассматриваемом параллелепипеде, изменяется со временем. Изменение это обусловлено: 1) действием внешних сил и столкновениями молекул между собой (эти причины изменяют не только импульс \bar{Q} , но и количество молекул N); 2) разным состоянием газа в разных точках пространства (в силу этого обстоятельства число молекул, попадающих в рассматриваемый элемент $dx \, dy \, dz$, не равно числу молекул, из него вылетающих); 3) средние величины импульса \bar{Q} не равны между собой для различных точек пространства.

Примем X , Y , Z – слагающие ускорения, производимого внешними силами в точке (x, y, z) , при которой находится в данный момент времени t рассматриваемый параллелепипед $dx \, dy \, dz$. Под влиянием этих сил импульс Q получает в течение времени dt приращение, равное

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial u_1} X + \frac{\partial Q}{\partial v_1} Y + \frac{\partial Q}{\partial \omega_1} Z \right) dt. \quad (3.61)$$

Среднее приращение величины импульса \bar{Q} для параллелепипеда $dx \, dy \, dz$ выразится тогда

$$\left(\frac{\partial \bar{Q}}{\partial u_1} X + \frac{\partial \bar{Q}}{\partial v_1} Y + \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \omega_1} Z \right) dt. \quad (3.62)$$

Приращение, которое получает \bar{Q} в течение времени dt вследствие столкновений молекул друг с другом, обозначим через

$$\frac{\delta \bar{Q}}{\delta t} dt. \quad (3.63)$$

Далее, пользуясь формулой (3.57), а также двумя аналогичными ей формулами, относящимся к площадкам перпендикулярным к осям OY и OZ , найдём, что через три грани параллелепипеда $dx dy dz$, точка пересечения которых находится в момент времени t в (x, y, z) , по прошествии dt в этот параллелепипед будет внесена движущимися молекулами сумма количеств Q , равная

$$\left((a-a')\bar{Q}N + \bar{\xi}Q\bar{N} \right) dydz + \left((b-b')\bar{Q}N + \bar{\eta}Q\bar{N} \right) dx dz + \left((c-c')\bar{Q}N + \bar{\zeta}Q\bar{N} \right) dx dy \Big| dt. \quad (3.64)$$

Через противоположные грани параллелепипеда за этот же промежуток времени произойдёт потеря суммы количеств Q , равная

$$\begin{aligned} & \left\{ \left((a-a')\bar{Q}N + \bar{\xi}Q\bar{N} + \frac{\partial}{\partial x} \left((a-a')\bar{Q}N + \bar{\xi}Q\bar{N} \right) dx \right) dydz + \right. \\ & + \left((b-b')\bar{Q}N + \bar{\eta}Q\bar{N} + \frac{\partial}{\partial y} \left((b-b')\bar{Q}N + \bar{\eta}Q\bar{N} \right) dy \right) dx dz + \\ & \left. + \left((c-c')\bar{Q}N + \bar{\zeta}Q\bar{N} + \frac{\partial}{\partial z} \left((c-c')\bar{Q}N + \bar{\zeta}Q\bar{N} \right) dz \right) dx dy \right\} dt. \end{aligned} \quad (3.65)$$

Вычитая из выражения (3.64) выражение (3.65) и, разделив разность на $dx dy dz$, найдём, что приращение $N \cdot \bar{Q}$ в течение времени dt , вследствие третьей из обозначенных причин, будет равно

$$- \left(\frac{\partial}{\partial x} \left((a-a')\bar{Q}N + \bar{\xi}Q\bar{N} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((b-b')\bar{Q}N + \bar{\eta}Q\bar{N} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((c-c')\bar{Q}N + \bar{\zeta}Q\bar{N} \right) \right) dt. \quad (3.66)$$

Обозначив через

$$\frac{d(\bar{Q}N)}{dt} dt \quad (3.67)$$

полное приращение для рассматриваемого параллелепипеда в течение времени dt , на основании предыдущего будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{d(\bar{Q}N)}{dt} = & N \frac{\delta \bar{Q}}{\delta t} + N \left(\frac{\partial \bar{Q}}{\partial u_1} X + \frac{\partial \bar{Q}}{\partial v_1} Y + \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \omega_1} Z \right) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left((a-a')\bar{Q}N + \bar{\xi}Q\bar{N} \right) - \\ & - \frac{\partial}{\partial y} \left((b-b')\bar{Q}N + \bar{\eta}Q\bar{N} \right) - \end{aligned} \quad (3.68)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z}((c-c')\overline{Q}N + \zeta\overline{Q}N).$$

Выполнив в трёх последних членах этого уравнения дифференцирование по x , y , z и заменив $a' = a$, $b' = b$, $c' = c$ (для случая, когда рассматриваемый параллелепипед движется вместе с газом), получим

$$\begin{aligned} \frac{d(\overline{Q}N)}{dt} + \overline{Q}N\left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial b}{\partial y} + \frac{\partial c}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(\xi\overline{Q}N) + \frac{\partial}{\partial y}(\eta\overline{Q}N) + \frac{\partial}{\partial z}(\zeta\overline{Q}N) = \\ = N\frac{\delta\overline{Q}}{\delta t} + N\left(\frac{\partial\overline{Q}}{\partial u_1}X + \frac{\partial\overline{Q}}{\partial v_1}Y + \frac{\partial\overline{Q}}{\partial w_1}Z\right). \end{aligned} \quad (3.69)$$

Это уравнение служит основой для всех дальнейших выводов.

Предположим что $Q = \text{const} = m$, получим уравнение

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial b}{\partial y} + \frac{\partial c}{\partial z}\right) = 0 \quad (3.70)$$

или, так как

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + a\frac{\partial\rho}{\partial x} + b\frac{\partial\rho}{\partial y} + c\frac{\partial\rho}{\partial z}, \quad (3.71)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot a)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot b)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot c)}{\partial z} = 0, \quad (3.72)$$

Формула (3.72) является уравнением неразрывности. Преобразуем уравнение (3.69) при помощи (3.70), получим

$$N\frac{d\overline{Q}}{dt} + \frac{\partial}{\partial x}(\xi\overline{Q}N) + \frac{\partial}{\partial y}(\eta\overline{Q}N) + \frac{\partial}{\partial z}(\zeta\overline{Q}N) = N\frac{\delta\overline{Q}}{\delta t} + N\left(\frac{\partial\overline{Q}}{\partial u_1}X + \frac{\partial\overline{Q}}{\partial v_1}Y + \frac{\partial\overline{Q}}{\partial w_1}Z\right). \quad (3.73)$$

Примем в этом уравнении Q последовательно равным

$$m \cdot u_1 = m \cdot (a + \xi), \quad m \cdot v_1 = m \cdot (b + \eta), \quad m \cdot w_1 = m \cdot (c + \zeta). \quad (3.74)$$

Так как $\bar{u}_1 = a$, $\bar{v}_1 = b$, $\bar{w}_1 = c$ не изменяются со временем от столкновений молекул друг с другом, то при всех трёх постановках $\frac{\delta\overline{Q}}{\delta t} = 0$ получаем

следующую группу уравнений движения газа

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{da}{dt} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \xi^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \xi \eta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \xi \zeta) &= \rho X \\ \rho \frac{db}{dt} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \xi \eta) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \eta^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \zeta \eta) &= \rho Y \\ \rho \frac{db}{dt} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \xi \zeta) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \eta \zeta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \zeta^2) &= \rho Z \end{aligned} \right\} \quad (3.75)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{da}{dt} + \frac{\partial X_x}{\partial x} + \frac{\partial X_y}{\partial y} + \frac{\partial X_z}{\partial z} &= \rho X \\ \rho \frac{db}{dt} + \frac{\partial Y_x}{\partial x} + \frac{\partial Y_y}{\partial y} + \frac{\partial Y_z}{\partial z} &= \rho Y \\ \rho \frac{db}{dt} + \frac{\partial Z_x}{\partial x} + \frac{\partial Z_y}{\partial y} + \frac{\partial Z_z}{\partial z} &= \rho Z \end{aligned} \right\} \quad (3.76)$$

где X_x, Y_y, Z_z – внешние силы.

Учёт диффузии в системе уравнений движения газов происходит по следующему принципу. Рассмотрим, например, газовую среду, состоящую из двух видов молекул и находящуюся в движении. Применим к газу с молекулами массой m_1 уравнение (3.73). Деля в нём последовательно Q на $m_1 u_1, m_1 v_1, m_1 w_1$, и, используя формулу полученную Д.К. Максвеллом [279],

$$\frac{\delta \bar{u}_1}{\delta t} = A_1 \cdot \sqrt{\frac{h}{m_1 + m_2}} \cdot N_2 \cdot m_2 \cdot (\bar{u}_2 - \bar{u}_1) = q \cdot A_1 \cdot \rho \cdot (a_2 - a_1), \quad (3.77)$$

где

$$q = \sqrt{\frac{h}{m_1 + m_2}}, \quad (3.78)$$

$$A_1 = 4\pi \int_0^\infty \alpha d\alpha \cos^2 \nu = 2,6595, \quad (3.79)$$

а также двумя аналогичными формулами для v_1 и w_1 , получаем

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 \frac{da_1}{dt} + \frac{\partial p_1}{\partial x} &= q \cdot A_1 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (a_2 - a_1) + \rho_1 X \\ \rho_1 \frac{db_1}{dt} + \frac{\partial p_1}{\partial y} &= q \cdot A_1 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (b_2 - b_1) + \rho_1 Y \\ \rho_1 \frac{dc_1}{dt} + \frac{\partial p_1}{\partial z} &= q \cdot A_1 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (c_2 - c_1) + \rho_1 Z \end{aligned} \right\}. \quad (3.80)$$

где h – постоянный коэффициент, определяемый в соответствии с [279].

Это уравнение диффузионного движения первого газа. Для второго газа будут аналогичные формулы.

Для многокомпонентных смесей (в том числе и рудничной атмосферы и её влажности) в системе уравнений (3.77) выражения

$$q \cdot A_1 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (a_2 - a_1), q \cdot A_1 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (b_2 - b_1), q \cdot A_1 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (c_2 - c_1) \quad (3.81)$$

Заменяются на следующие соответственно

$$A_1 \cdot \rho_1 \cdot \sum q \cdot \rho_n \cdot (a_n - a_1), A_1 \cdot \rho_1 \cdot \sum q \cdot \rho_n \cdot (b_n - b_1), \\ A_1 \cdot \rho_1 \cdot \sum q \cdot \rho_n \cdot (c_n - c_1), \quad (3.82)$$

взятые по n и распространённые на все рассматриваемые газы, то есть для остальных $n-1$ газов, получилось бы $n-1$ уравнений, где

$$\sum q = \sqrt{\frac{h}{m_1 + m_2 + \dots m_n}}. \quad (3.83)$$

3.6. Место математической модели в рудничной аэрологии

Предлагаемая к использованию математическая модель процессов, происходящих в рудничной атмосфере при проветривании горных предприятий, основана на представлении о молекулярном строении воздуха. Для понимания места данной математической модели рассмотрим историю развития рудничной аэрологии.

Если рассматривать развитие рудничной аэрологии как науки, то её историю до настоящего времени можно условно разделить на 4 видимых периода (рисунок 3.2). Первый период берёт своё начало с активного ведения горных работ (более или менее обстоятельно описанных в литературе).

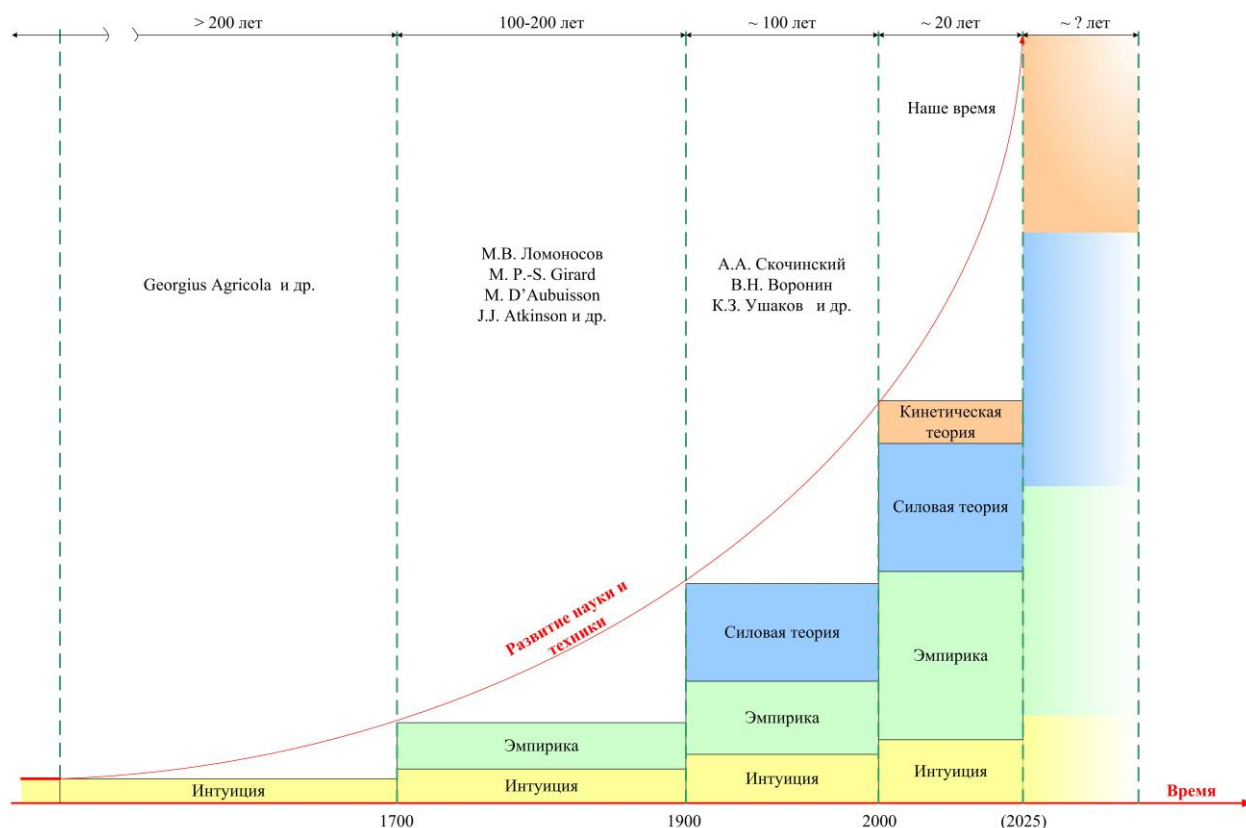


Рисунок 3.2 – Схема развития рудничной аэрологии

Первый период характерен небольшим объёмом добываемых полезных ископаемых, незначительным населением планеты и нахождением полезных ископаемых в легкодоступных местах, практически на поверхности, соответственно объёмы горных работ были небольшие. Поэтому отсутствовала необходимость проветривания горных выработок. Если и добывали кремний или известняк, то, как правило, на глубинах не более 10 метров. Информации по данному периоду о проветривании дошло не много, но с уверенностью можно сказать, что уже тогда активно использовали явления естественной тяги, о чём говорят сохранившиеся по настоящее время вертикальные штольни в Италии. Знания и применяемые методы в тот период были интуитивные, т.е. наблюдения за явлениями природы активно применялись горняками того времени (разжиганием костров в горных выработках).

Интуиция в каждом рассматриваемом периоде присутствует на начальном этапе проведения исследований, и с каждым разом она активнее применяется, по мере того, как человечество накапливает знания о природе

происходящих явлений, растёт кругозор за счёт накопления и распространения информации.

Второй период условно берёт своё начало со времён М.В. Ломоносова и его работы по естественной тяге [159]. Длится период чуть более 200 лет. Он характеризуется опытной наукой, когда на основе эксперимента делаются выводы, получаются закономерности, используемые в рудничной вентиляции. В этот период создаются основополагающие работы J.J. Atkinson'a [293], M. P.-S. Girard'a [306], M. D'Aubuisson'a [301] и ряда других учёных, их выводы используются в расчётах и сегодня.

Третий период, наиболее близкий к нам, предлагается отсчитывать от работы А.А. Скочинского [219]; он длится в течение 100 лет. В своём исследовании он обозначает возможности того периода по проектированию вентиляции шахт и рудников. На сто лет вперёд он ставит задачи по математическому обоснованию происходящих в рудничной атмосфере процессов. Фундаментальный труд делает его ученик В.Н. Воронин [14] И, чуть позднее, ученик А.А. Скочинского в третьем поколении – К.З. Ушаков [239], который производит революцию в рудничной аэрологии, описывая процессы и явления, происходящие при проветривании, математическими закономерностями используя «силовую» теорию строения воздуха. Основной трудностью того времени представляют расчёты для всей вентиляционной сети по этим законам. Эмпирический метод познания процессов и явления рудничной вентиляции выходит на новый уровень, появляются новые приборы и лаборатории, создаются и активно развиваются научно-исследовательские институты.

В начале 2000 годов условно наступает четвёртый период развития рудничной аэрологии. Он характеризуется появлением сверхмощных компьютеров, способных производить огромное количество расчётов за небольшие промежутки времени. И «силовая» теория, основанная на уравнениях Навье-Стокса, методом конечных объёмов решается для всей вентиляционной сети в объёме горных выработок.

Логично предположить следующий виток развития рудничной аэрологии, заключающийся в переходе от «силовой» теории к кинетической теории газов. Это позволит по-новому изучать процессы и явления, которые происходят при проветривании горных предприятий.

Следует отметить также тот факт, что каждый временной интервал, каждого из отмеченных периодов постоянно сокращается, что объясняется активным ростом населения планеты и соответствующим ростом энергопотребления. При этом растёт уровень знаний у людей, и новое всё быстрее создаётся, внедряется и эволюционирует.

Выводы

Анализ математических описаний процессов проветривания горных выработок показал, что в настоящее время в методологии проектирования вентиляции используется «полуматематические и полуэмпирические теории», базирующиеся на формулах, полученных опытным путём для определённых горно-геологических условий, поэтому их применение не обеспечивает необходимую точность расчётов для обеспечения аэрологической безопасности.

Предложено математическое описание процессов проветривания горных предприятий, основанное на молекулярной кинетической теории газов. В основе рассуждений положена гипотеза о выравнивании количества молекул в объёме горных выработок и выработанного пространства как физического смысла разности давлений и скорости движения воздуха. В детальной проработке эта теория позволит избежать применения эмпирических формул и коэффициентов. Данная теоретическая модель может быть использована для расчёта проветривания любых типов и размеров горных выработок. Таким образом, развитие кинетической теории газов в данном направлении позволит создать единую математическую базу системного проектирования вентиляции горных предприятий.

В предложенной математической модели аэродинамическое сопротивление трения представляется в виде двух составляющих: внешнего и внутреннего трения. Первое характеризует потерями энергии при движении воздуха за счёт столкновения с твёрдыми границами (бортами, почвой, кровлей выработок, горным оборудованием, вентиляционными сооружениями и т.д.) и описывает уменьшение статического давления, затрачиваемого на преодоления аэродинамического сопротивления трения, местных и лобовых сопротивлений. Второй вид сопротивления, позволяет учесть потери энергии из-за внутренних течений (разнонаправленные потоки газоздушных струй, отличающихся по плотности, в одной горной выработке). Данный вид сопротивления учитывает внутреннее трение газов, их физические свойства и температуру.

В математической модели, основанной на кинетической теории газов, теплопроводность учитывается по обобщенной теории перераспределения энергии от одного элемента к другому. Переход энергии в виде тепла зависит от свойств газов, составляющих рудничную атмосферу, и определяется коэффициентом теплопроводности.

Диффузия газов в рудничной атмосфере, по представленной модели, существенно зависит от давления и температуры. Предложенная зависимость позволяет учесть физические свойства газов, из которых состоит воздух в горных выработках.

Общее уравнение движения воздуха по горным выработкам выведено также с учётом кинетической теории газов. Оно представлено уравнениями диффузионного движения газов.

Данная математическая модель и современные вычислительные ресурсы позволяют на новом уровне изучать процессы проветривания.

Представленная математическая модель в настоящее время не используется в программных средствах для проведения трёхмерного моделирования. Однако программные комплексы позволяют использовать вместо уравнений Навье-Стокса, другие зависимости, что будет предметом дальнейших исследований.

ГЛАВА 4. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВЕНТИЛЯЦИИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

4.1. Системное проектирование вентиляции шахт и рудников

В настоящее время существуют несколько вариантов системного проектирования сложных систем, основанных на разных подходах. Применительно к проветриванию горных предприятий суть первого из них заключается в том, что проектирование системы вентиляции должно производиться не в рамках нормативных параметров, определённых Правилами безопасности, но и за их пределами. Создание системы должно иметь многократный запас надёжности – так, чтобы она выдержала воздействие опасных факторов в широком диапазоне их изменения в процессе ведения горных работ при различных сценариях их развития, в том числе аварийных. Все необходимые константы в расчётах также следует принимать в широком диапазоне возможных значений. При таком подходе решение может быть весьма затратным с точки зрения экономики, но при этом оно может обеспечивать максимальный уровень безопасности, что при сравнении с затрат на ликвидацию возможных аварий делает его более эффективным и предпочтительным. Примером такого решения является применяемая в США многоштрековая подготовка выемочных участков.

Второй подход системного проектирования вентиляции шахт и рудников предлагается рассматривать в контексте имеющихся знаний в области кинетической теории газов. Описание процессов движения молекул газов позволяет отказаться от эмпирических формул, полученных под конкретные условия ведения горных работ, климата, геологических условий и коэффициентов, величина которых иногда подбирается под необходимое решение. При данном подходе основой системного проектирования вентиляции шахт и рудников является математическая модель, описывающая явления и процессы, происходящие при проветривании. Рассчитать вручную данную

систему уравнений методом конечных объёмов, позволяющих изучать все процессы в трёхмерной постановке, наиболее близкой к реальности, можно только с применением специальных программ и вычислительных ресурсов. Получаемые объёмные модели – виртуальные аналоги при решении уравнений, описывающих физические законы движения газов, позволят по новому проводить проектирование вентиляции горных предприятий. Для этого необходимо создать методологии системного проектирования вентиляции горных предприятий, учитывающую взаимосвязи и динамику внутренних элементов, свойства системы и её связи с внешними факторами, с учётом развития системы в процессе функционирования (трансформации), что является целью данной работы.

Для достижения цели и решения задач разработана дорожная карта исследований (рисунок 4.1).

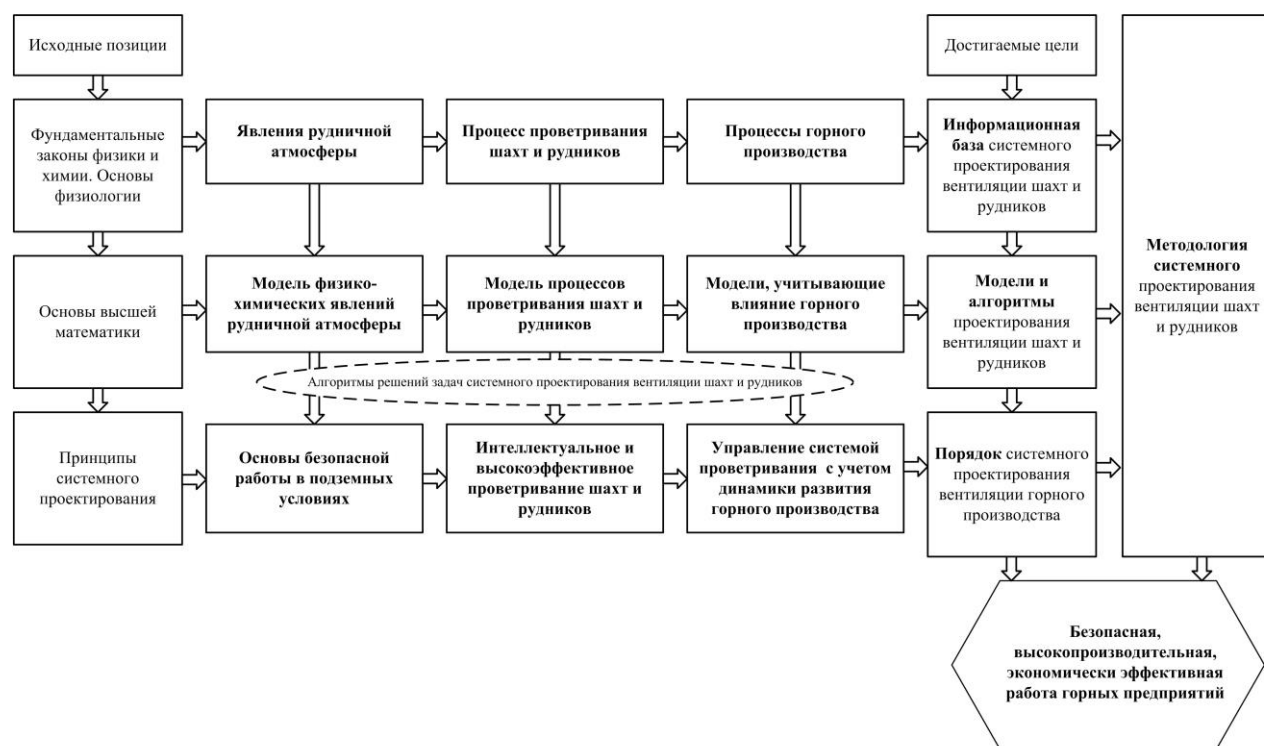


Рисунок 4.1 – Дорожная карта диссертационного исследования

Вычислительные ресурсы сегодня – суперкомпьютеры, рабочие станции, трёхмерные лаборатории, виртуальная реальность, позволяют ставить и решать самые сложные математические задачи.

Лабораторные исследования в кабинетах, натурные исследования в шахтах и на рудниках с получением эмпирических зависимостей для конкретных условий с большим количеством допущений и упрощений должны остаться для верификации математических моделей, для выработки требований к исходным данным и к граничным условиям моделирования. Это необходимо ещё и потому, что в основе математической модели и последующего моделирования лежит высокоинтеллектуальная трудоёмкая работа по изучению явлений, происходящих при проветривании горных предприятий. От качества и глубины проведённых исследований зависит точность расчётов.

При разработке виртуальных аналогов различных вариантов схем и способов проветривания как всей шахты, так и отдельных её элементов, по мере создания баз исходных данных по отдельным параметрам рудничной атмосферы, вентиляционных сетей, характеристикам физико-химических явлений, происходящих в рудничной атмосфере, – работы по системному проектированию вентиляции горных предприятий станут менее трудоёмкими. Время проведения системного проектирования также может быть снижено в условиях создания единых систем коллективного пользования. Для этого могут применяться системы облачного хранения данных.

Современные системы подземной добычи полезных ископаемых характеризуются множеством распределенных в пространстве и времени физических и физико-химических процессов, определяющих, в конечном итоге, эффективность и безопасность ведения горных работ по добыче полезных ископаемых и горно-строительных работ. Интенсивное движение горных работ в глубь недр осложняется неконтролируемым развитием таких процессов, которые сопровождаются переходом системы подземной добычи полезных ископаемых в состояние катастрофы, поэтому создание теоретической базы расчёта параметров имеет первостепенное значение для проектирования и управления фундаментальными процессами, протекающими в недрах при разработке месторождений.

Проветривание горных предприятий необходимо рассматривать как «систему в системе» – вентиляционная система и её взаимосвязи с горно-технологической системой [70, 347].

Данный подход, учитывающий все вышеперечисленные моменты, мы будем называть – «системное проектирование вентиляции».

Системное проектирование вентиляции шахт и рудников, как и системное проектирование в целом [11], «комплексно решает поставленные задачи, принимает во внимание взаимодействие и взаимосвязь отдельных объектов-систем и их частей, как между собой, так и с внешней средой, учитывает социальные, экономические и экологические последствия их функционирования» [11]. Системное проектирование предусматривает рассмотрение объекта проектирования как совокупность протекающих в нём процессов. Поэтому создание виртуальных аналогов аэрогазотермодинамических систем в процессе проектирования нового предприятия позволяет использовать те же модели в период эксплуатации.

Перспективным направлением дальнейшего развития системного проектирования вентиляции шахт и рудников будут гибридные системы, позволяющие увязывать: системы аэрогазового контроля; дегазации; параметры процессов ведения горных работ по добыче и проходке; системы энергопотребления; системы мониторинга состояния земной атмосферы и массива горных пород. Первые попытки таких технологий на базе программ воздухораспределения уже создаются у нас в стране [128] и за рубежом [305, 341].

Системное проектирование вентиляции шахт и рудников должно быть интеллектуальным, сопряжённым с автоматическими системами управления вентиляционным оборудованием. При этом управление режимами работы вентиляционных устройств должно основываться на фактических значениях концентраций контролируемых газов, температуры, влажности и пыли, получаемых от стационарных систем.

В итоге, при правильном применении системного проектирования вентиляции горных предприятий и вычислительных средств проявятся следующие преимущества:

- 1) повышение качества проектных решений по проветриванию горных предприятий;
- 2) расширение возможностей научного обоснования принимаемых решений, в том числе при оперативном проектировании и планировании горных работ в процессе эксплуатации;
- 3) своевременное получение результатов перерасчёта при изменении влияющих параметров существенно повысит безопасность ведения горных работ;
- 4) сокращение расходов на проектирование и проработку множества проектных вариантов;
- 5) возможность визуализации сложных аэрогазотермодинамических процессов (распределение концентраций газов, температуры, скоростей, давления и т.д.), что позволит выявить «узкие места» в проектируемой системе.

Сочетание всех преимуществ приводит к появлению ряда альтернативных решений, из которых можно выбрать наиболее оптимальный вариант для каждой конкретной ситуации.

Сфера применения системного проектирования может быть представлена в виде схемы (рисунок 4.2), предложенной М.Д. McPherson [332]. Сегодня применение компьютера для расчётов возможно лишь для некоторых задач, показанных на данном рисунке. В ряде случаев [290, 305, 340, 349] эти задачи сводятся к мониторингу и контролю параметров рудничной атмосферы. В других случаях решаются отдельные задачи [289, 297, 299, 304] по описанным ранее моделям для прогноза газообильности, температуры, пылевыведения и т.д.

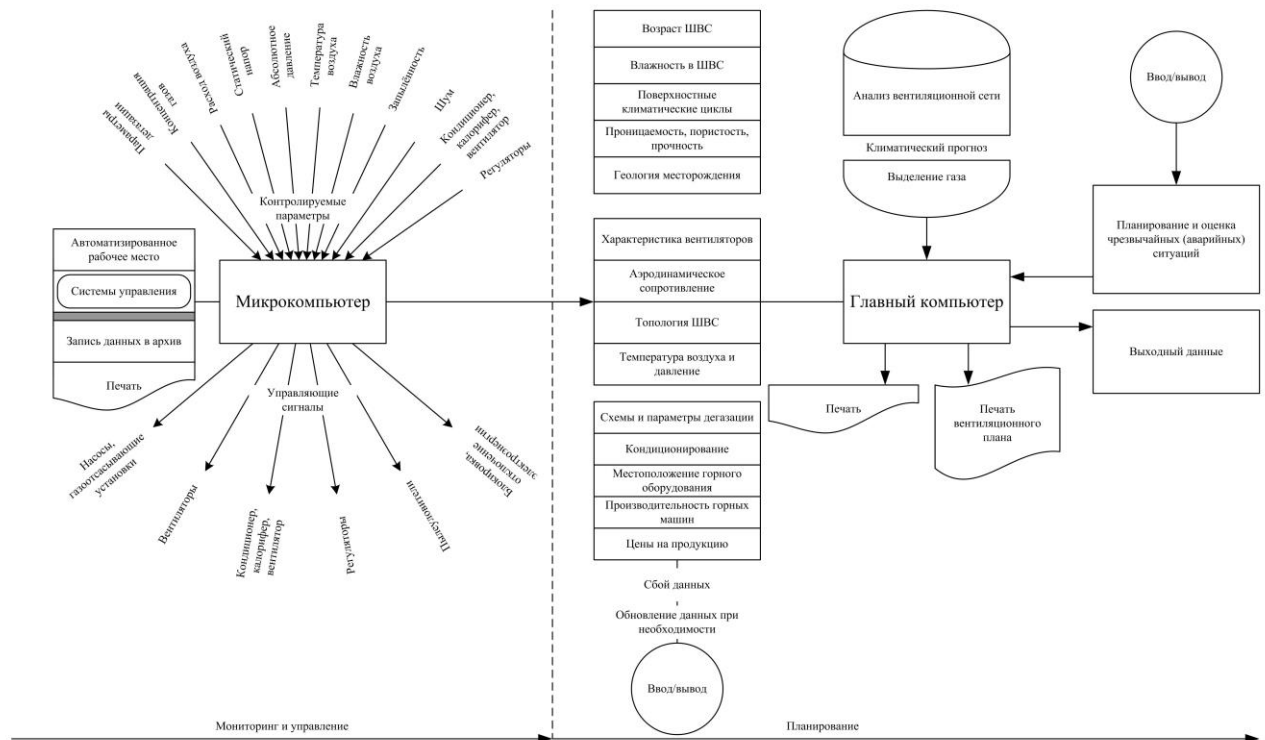


Рисунок 4.2 – Область применения компьютерных приложений в шахтной вентиляции

Большинство решений, принимаемых по проветриванию, не учитывают горнотехническую систему, её влияние прямое и косвенное влияет на эффективность проектных решений и безопасность по аэрологическому фактору.

4.2. Вентиляционная система и её взаимосвязи в общей горно-технологической системе

Проветривание горного предприятия – это жизненно необходимый процесс для его функционирования. В горном деле существует тесная взаимосвязь системы вскрытия, подготовки и разработки месторождения со схемой проветривания и способами управления газовыделением. Нагрузка на добычные участки и темпы проходки горных выработок зависят от схемы и способа проветривания, выбора мероприятий по снижению запыленности, мероприятий по разрушению местных и слоевых скоплений газов, туманов и аэрозолей. При этом для безопасной, устойчивой и эффективной работы

горного предприятия системные решения по вентиляции должны быть взаимоувязаны с технологической схемой производственных процессов. Именно технология определяет основные параметры системы вентиляции, в свою очередь система проветривания накладывает свои требования на условия ведения горных работ. Отсутствие системного видения аэрогазотермодинамических процессов и их связи с технологическими процессами проходки и добычи полезных ископаемых приводит к катастрофам.

Разработке проекта вентиляции предшествует сбор исходной информации, включающий:

- сведения о климатических особенностях района;
- сведения о геологии месторождения (газоносность, вероятность газодинамических явлений (внезапных выбросов угля и газа, суффляров и др.), физико-химические свойства горных пород (в т.ч. склонных к самовозгоранию), пылеобразующая способность, взрывчатые свойства пыли и др.);
- сведения о планируемых к применению технологий и технических средств (способ строительства и/или разработки месторождения и проходки), транспортирования горной массы, грузов и людей;
- сведения об аэродинамических сопротивлениях горных выработок и вентиляционных сооружений (в необходимых случаях выполняются специальные исследования);
- сведения о планируемых технико-экономических показателях и др.

При этом роль управляющей системы отводится именно технологической части, задача которой обеспечить требуемую нагрузку по добыче на забой или на проходку при минимальных аэрологических рисках. Это означает, что все технические решения должны быть направлены на снижение эндогенной пожароопасности, вероятности загазирования и обеспечения условий для оперативной локализации и ликвидации возможных аварий. На примере условной схемы взаимного влияния горно-технологической и вентиляционной систем угольной шахты по фактору метановыделения (рисунок 4.3) можно

видеть сложную взаимосвязь их элементов. Если к приведённой схеме добавить аналогичные блоки задач обеспечения безопасности по другим аэрологическим факторам (газы от машин с двигателями внутреннего сгорания, пыль, аэрозоли, выделение радиоактивных частиц и т.д.), то можно представить всю сложность рассматриваемых процессов.

Каждый элемент условной схемы (рисунок 4.3) является подсистемой, внутри которой находятся другие взаимосвязанные элементы. Причём связь их будет как внутри каждой подсистемы, так и с внешней для неё средой.

Все влияющие на проветривание факторы, по мнению ряда учёных [219, 324, 325], могут изменяться в ограниченном диапазоне. Это позволяет оптимизировать проектирование вентиляционных систем. При системном проектировании проветривания важным отличительным моментом является учёт нештатных значений параметров (аварийные ситуации), находящихся вне рамок допустимых диапазонов.

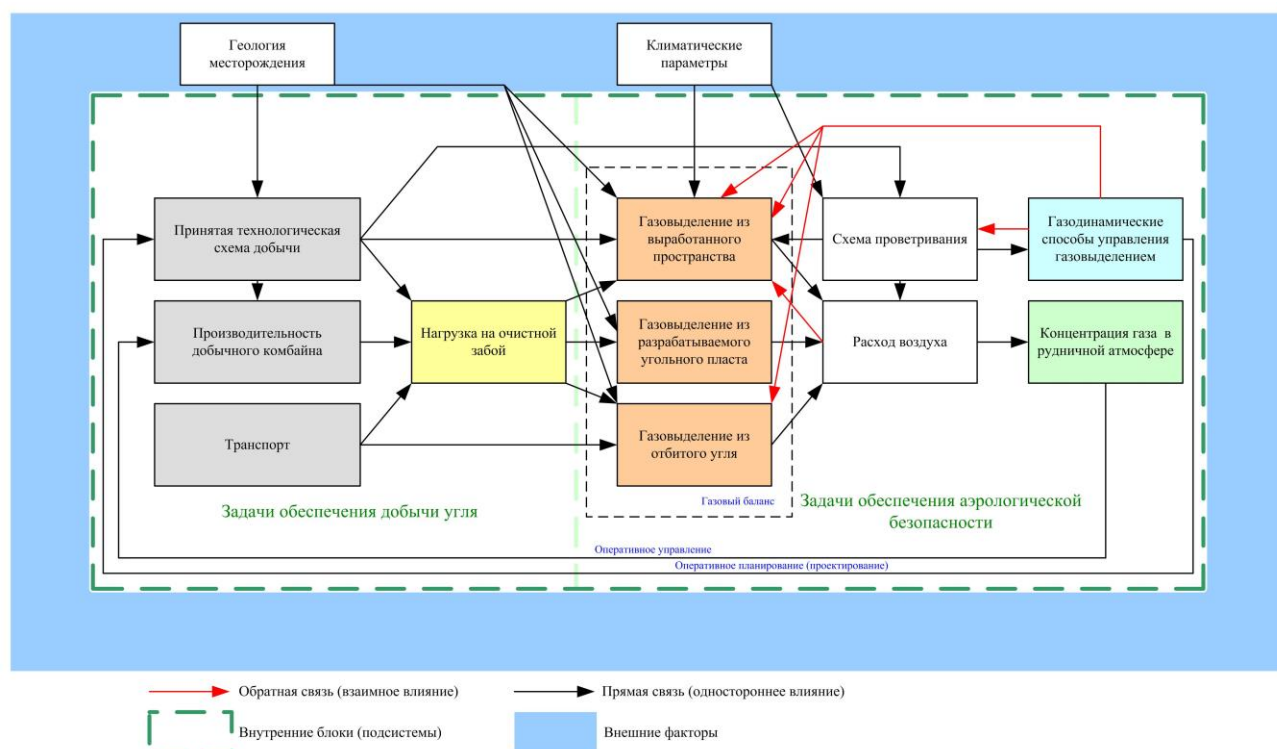


Рисунок 4.3 – Условная схема взаимного влияния горно-технологической системы на метановыделение

H.L. Hartman [312] утверждает, что различные проекты могут быть оценены по их целесообразности и по таким критериям, как капитальные и эксплуатационные затраты, эффективность использования вентиляционных устройств (вентиляторов, эжекторов, насосов), гибкость для адаптации к возможным изменениям в технологии и условиях ведения горных работ. Взаимосвязь системы проветривания с горнотехническими системами можно проследить по схемам 4.4 и 4.5, составленным G.W. Luxbacher и R.V. Ramani. [326], согласно которым ряд производственных факторов прямо или косвенно влияет на параметры проветривания. В них показана многофакторная структура, учитывающая все возможные аспекты (социальные, административные, природоохранные, экономические, горнотехнические и т.д.). Данные схемы отображают системный подход к проектированию горных работ, включая проектирование вентиляции, как отдельной подсистемы. В предложенных схемах нет механизма взаимного влияния всех факторов на проветривание горного предприятия.

4.3. Обоснование определяющих факторов при системном проектировании вентиляции

При системном проектировании вентиляции различают внутренние и внешние факторы. К внутренним факторам, достаточно подробно описанным выше (глава 3), относятся: диффузия газов, внутреннее и внешнее трение газов, теплопроводность. Причём все эти факторы рассматриваются в их динамике в пространстве и времени, описываемые аналитическими уравнениями, а также с точки зрения кинетической теории газов. В дальнейшем перечень параметров может быть расширен по мере формирования необходимых баз данных и создания моделей по другим факторам (аэрозолям, радиоактивным излучениям и прочее).

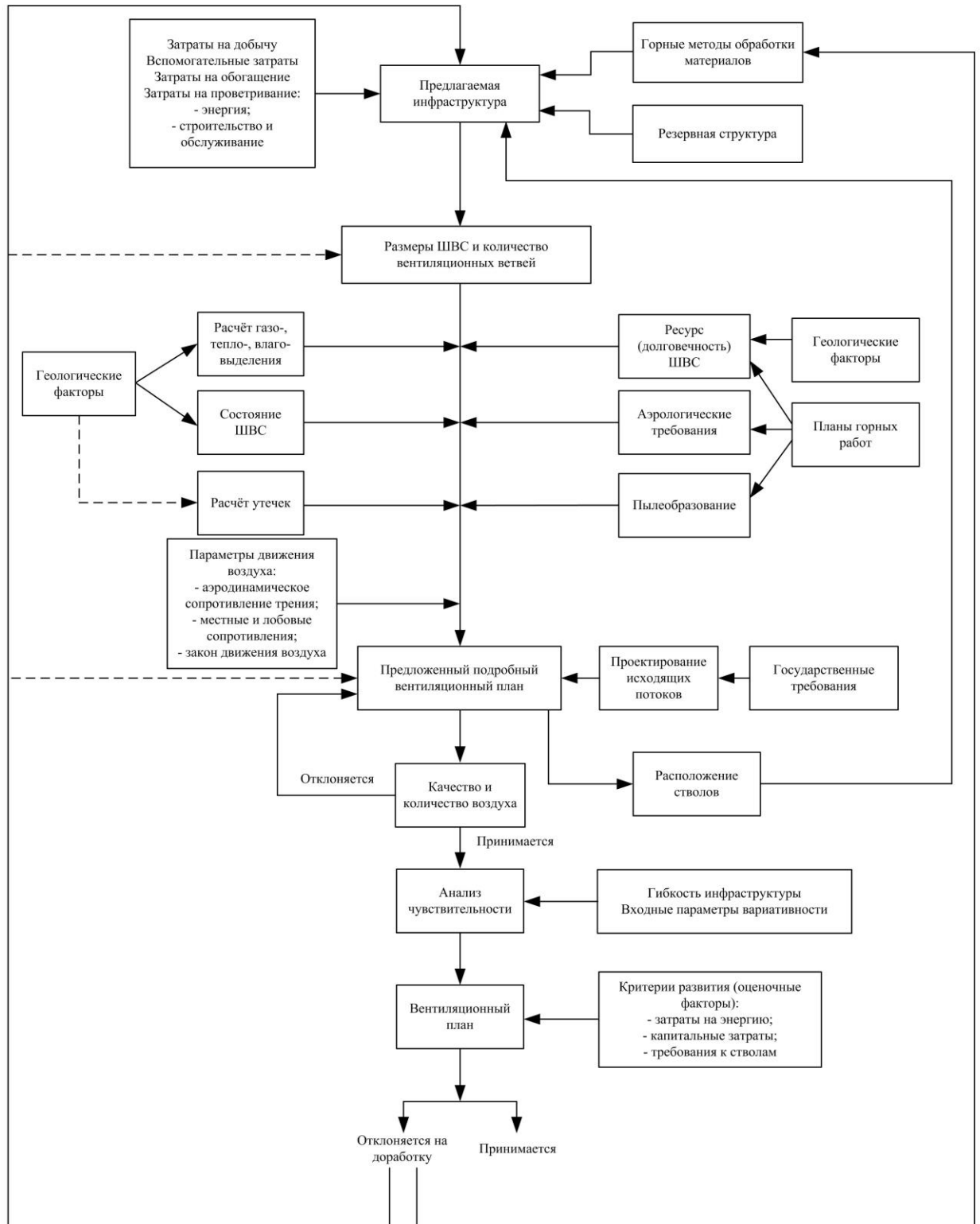


Рисунок 4.4 – Блок-схема алгоритма проектирования проветривания горного предприятия [326]

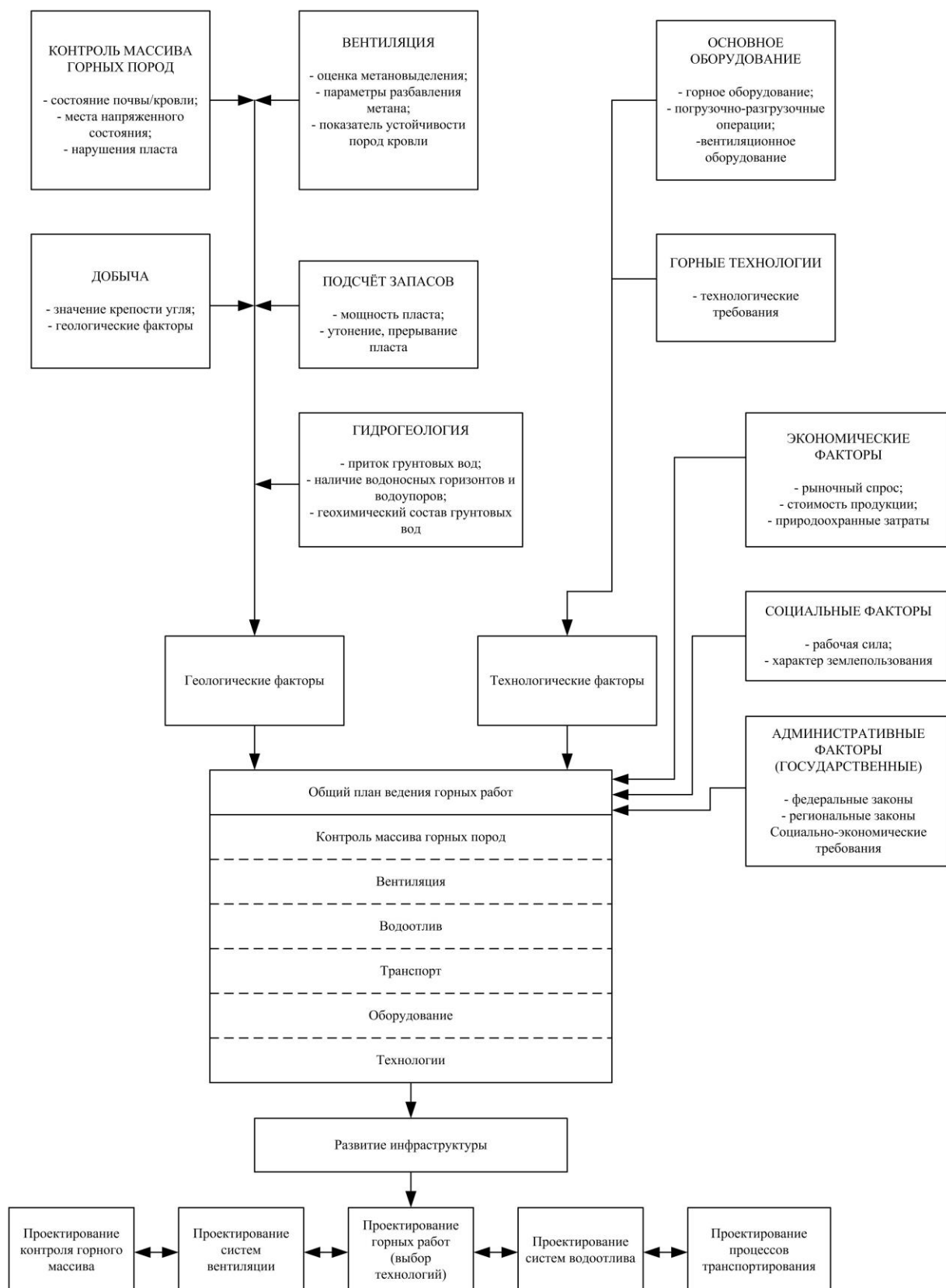


Рисунок 4.5 – Взаимодействие между общешахтным проектированием и системным проектированием вентиляции шахт [326]

Внутренние факторы определяются разработанными моделями аэрогазотермодинамических процессов в горных выработках. Внешние факторы являются начальными и граничными условиями протекания этих процессов. Их можно разделить по явлениям:

- 1) при естественной тяге:
 - перепад температур;
 - плотность воздушных масс;
 - химический состав земной атмосферы;
 - перепад высот;
 - атмосферные колебания давления;
 - атмосферные колебания температуры;
 - атмосферные колебания влажности;
- 2) при газовыделении:
 - пластовое давление;
 - газоносность;
 - проницаемость;
 - пористость массива и выработанного пространства;
 - крепость вмещающих пород;
- 3) при тепловыделениях:
 - температура массива;
 - температурный градиент;
 - тепловыделение от горного оборудования и технических устройств;
 - тепловыделение от окислительных процессов.

Каждый фактор является причиной физического и/или химического процесса, происходящего в рудничной атмосфере. Их можно характеризовать параметром, который является постоянным в определённый промежуток времени, или может меняться по известной зависимости. Так, например, можно считать газовыделение с обнажённой поверхности угольного пласта постоянным, если мы рассматриваем капитальные горные выработки. А если мы рассматриваем горные выработки при проходке, создаём их виртуальные

аналоги и в рамках решения задач по системному проектированию вентиляции подбираем оптимальные способ и схему проветривания, то газовыделение задаётся переменной величиной, изменяющейся во времени и пространстве. Таким образом, учитывается временной принцип системного проектирования вентиляции горных предприятий.

Виртуальный аналог подземной аэрогазотермодинамической системы должен соответствовать поставленной цели системного проектирования – повышение качества проектных решений, обеспечивающих минимизацию аэрологических рисков [6, 7, 238]. На выходе получают конкретные параметры проветривания шахт и рудников, которые определяются на основе объёмной визуализацией распределения основных внутренних факторов в вентиляционных потоках (скорость и направление движения воздуха, давление, концентрация вредных и опасных газов) с учётом всех вышеперечисленных внешних факторов.

4.4. Основные принципы системного проектирования

Системное проектирование вентиляции шахт и рудников должно базироваться на системном подходе. Под термином «системный подход» [10] понимают «направление методологии научного познания, в основе которого лежит рассмотрение объекта как системы: целостного комплекса взаимосвязанных элементов».

Основоположниками системного подхода являются А.А. Богданов, Ludwig von Bertalanffy, Edward de Bono, Lyndon Hermyle La Rouché Jr, Herbert A. Simon, Peter Ferdinand Drucker, С.А. Черногор, А.Н. Малюта. Сегодня нет точного перечня принципов, по которым должны строиться системы.

Основные принципы системного подхода при проектировании вентиляции горных предприятий [97]:

- целостность:

позволяет рассматривать одновременно систему как единое целое и в то же время – как подсистему для вышестоящих уровней;

- иерархичность строения:

т.е. наличие нескольких подсистем и систем, при этом одни системы, подсистемы и их элементы находятся в подчинении у других;

- структуризация:

позволяет анализировать отдельные подсистемы и системы в их взаимосвязи. При этом структура системы и подсистем зависит от отдельных параметров, элементов тех же систем и подсистем;

- множественность:

Позволяет использовать большое количество моделей для описания отдельных элементов, подсистем и системы в целом;

- системность:

признаки системы должны иметь те же алгоритмы, что и её подсистемы. Данное утверждение распространяется на все системы нашего мира, и действуют как в системе организма человека [197], так и в системе мирового энергопотребления [196] и т.д.;

- практическая полезность:

проектирование вентиляции горных предприятий должно быть целенаправленным. В результате должен быть документ – проект, удовлетворяющий требованиям Правил безопасности, санитарно-гигиеническим нормам, комфортности горнорабочих, экономической рентабельности, природоохранных норм. Важно определить факторы, препятствующие максимально эффективно использовать имеющиеся вентиляционные устройства. Параметры проветривания должны быть научно обоснованы. Необходимо найти оптимальные варианты сочетаний различных параметров проветривания с учётом возможных изменений во всей системе;

- единство составных частей:

исследуемый объект – процесс проветривания горных предприятий – рассматривается как система, внутри которой можно выделить логически связанные простые части – подсистемы. При этом единство всех этих подсистем позволяет выявить, зафиксировать и в будущем при необходимости спрогнозировать качественно новые свойства системы. Важной частью системы проектирования вентиляции шахт и рудников является человек – горный инженер, проектировщик, занимающийся вопросами планирования, контроля и управлением проветривания. Безопасность ведения горных работ в первую очередь направлена на сохранение жизни и здоровья человека. Для горнорабочего создаются системы проветривания, управления и контроля. Им же и эксплуатируются эти системы, поэтому человек рассматривается в качестве одной из взаимодействующих систем. При этом важными являются человеческий фактор и риски, возникающие от человеческих ошибок [256, 257]. Подготовка горных инженеров должна вестись с учётом современных условий ведения горных работ, уровня информатизации и коммуникации, средств проведения сложных расчётов и гибридных технологий. Одним из результатов диссертационного исследования, проводимого в передовом Московском горном институте Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», является учебная программа подготовки горных инженеров по дисциплинам «Аэрология горных предприятий» и «Технологии горноспасательного дела» на которой выпущены учебные пособия [71, 73, 101, 281];

– изменяемость во времени:

системное проектирование вентиляции шахт и рудников должно производиться на всех «жизненных» этапах горного предприятия: проектирование, эксплуатация, завершение горных работ и подготовка к консервации и/или ликвидации. Существенную роль при исследовании всех процессов, происходящих в рудничной атмосфере, играет фактор

времени, это и процессы газовыделения во времени из всех источников, и разбавление примесей во времени, и т.д. Правилами безопасности многие временные рамки уже фиксированы, так регламентировано разбавление газов, образующихся после проведения взрывных работ в течение 30 минут, или газовыделение в забое должно разбавляться мгновенно, при этом минимальная временная единица, используемая в рудничной аэрологии, равна одной секунде, под этим и будем понимать термин «мгновенно».

При анализе и синтезе мультисплит систем может быть использован системный подход или индуктивный (классический) подход (рисунок 4.3). В настоящее время при проектировании вентиляции горных предприятий, на стадии анализа, а также принятия решений по проветриванию при эксплуатации применяется индуктивный подход. Он заключается в том, что от частного (например, прогноза газовыделения) переходят к общему (расчёту необходимого количества воздуха для разбавления газов до уровня, регламентированного Правилами безопасности). Это делается по нескольким факторам (пыль, температура, другие газы, аэрозоли и т.п.) и далее синтезированием (конструированием) создаётся система путём сравнения требуемых расходов воздуха по каждому фактору, рассматриваемому отдельно.

Как видно (рисунок 4.6), индуктивный подход основан на суммировании отдельных элементов в единую модель, при этом каждый элемент (или их цепочка – компонент) решает свои локальные задачи и изолирован от других элементов модели. При этом упускаются сложные внутренние связи между исходными данными и результатами расчётов. Например, расход воздуха (скорость его движения) существенно влияет на величину местных и лобовых сопротивлений. Последние в свою очередь учитываются лишь общим процентом (10 %) к величине депрессии, затрачиваемой на преодоление сопротивления трения. Поэтому данный подход должен использоваться только для простых систем, в которых возможно разделение на взаимно независимое исследование и проектирование.

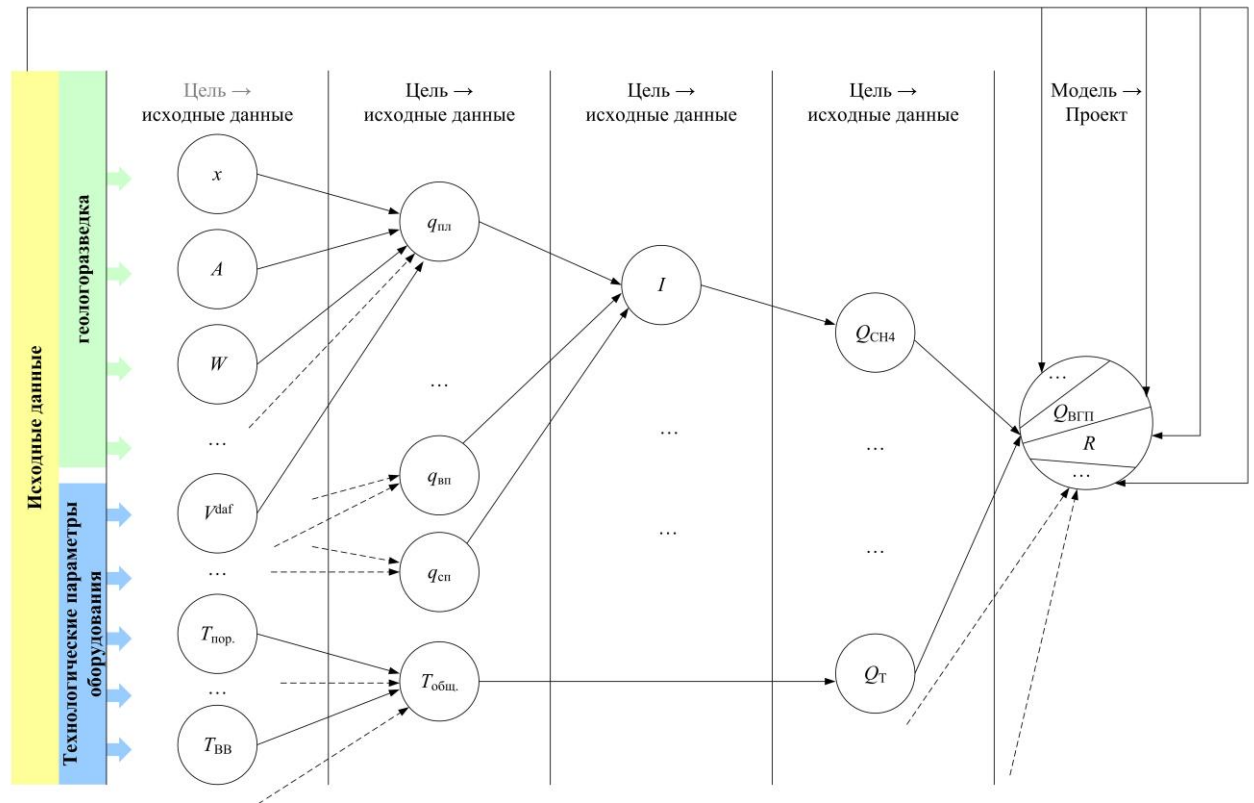


Рисунок 4.6 – Схематическое изображение применяемого индуктивного подхода при проектировании вентиляции горных предприятий

При системном подходе идут от общего к частному, где первоначально исследуемый объект выделяется из окружающей среды, ставится цель – обеспечение безопасности ведения горных работ по аэрологическому фактору. И от общего – схемы и способа проветривания горного предприятия, переходят к частному выбору способов управления газовыделением, выбору вентиляционных сооружений, видов сопряжений горных выработок, вентиляторов и т.д. После чего оптимальные параметры по отдельным объектам служат основой для оптимизации параметров на вышележащих уровнях, т.е. от частного к общему. Предлагаемый системный подход представлен схематически на рисунок 4.7.



Рисунок 4.7 – Системное проектирование вентиляции во взаимосвязи с горнотехнической системой

Важной особенностью системного проектирования является добавление процесса управления параметрами проветривания, контроля утечек и подсосов воздуха, места выноса вредных и опасных газов, обнаружение и ликвидация местных скоплений газов и пыли, локальные места с повышенной температурой, параметры работы дегазации и газоотсоса.

Под системой будем понимать максимально возможное количество факторов разной природы, влияющих на проветривание горного предприятия. Факторы можно условно разделить на внутренние и внешние. Внутренние факторы – это те, которые находятся, попадают или образуются в горных выработках, начиная от устья вскрывающих выработок (параметры диффузии, химические реакции, внутреннее трение и т.п.). К внешним факторам относятся климатические, горно-геологические и технологические параметры (атмосферное давление, температура, влажность, газоносность, скорость подвигания забоя, время изменения топологии сети и аэродинамических характеристик и т.п.).

Создание методологии системного проектирования вентиляции шахт и рудников направлено на упорядочение процессов получения и обработки

информации с учётом того, что большое количество факторов, влияющих на вентиляцию, взаимодействуют между собой и с внешней средой.

«Ограниченность возможностей экспериментального исследования больших систем делает актуальной разработку методики их моделирования, которая позволила бы в соответствующей форме представить процессы функционирования системы, описать протекание этих процессов с помощью математических моделей, получить результаты экспериментов с моделями» [226]. Причём на различных этапах существования горного предприятия моделированием решаются конкретные задачи. Например, на стадии проектирования горного предприятия, создаваемые виртуальные аналоги позволяют выбрать оптимальный способ и схему проветривания проходческого, выемочного участка или шахты в целом. На стадии ведения горных работ с учётом изменяющихся условий (например, изменение технологии или уточнение горно-геологических данных при доразведке и т.д.) могут быть скорректированы заложенные проектом параметры проветривания.

При решении поставленных задач используются модели – виртуальные аналоги подземных аэрогазодинамических систем. Виртуальный аналог позволяет проводить эксперименты с целью получения дополнительной информации об объекте исследования, а также позволяет просмотреть варианты развития различных сценариев («взгляд в будущее»). В процессе исследований свойств проектируемого объекта с целью выбора оптимальных решений виртуальный аналог представляет собой объёмную модель аэрогазотермодинамических процессов в проходческом забое, на выемочном участке, в отдельной горной выработке или её части. Полученные решения для данного отдельного объекта используются при рассмотрении всей шахты или рудника. При этом необходимо учитывать, что адекватность виртуального аналога зависит от корректности поставленных задач и принятых начальных и граничных условий.

Целевое назначение создания виртуальных аналогов подземных аэрогазотермодинамических систем и последующего моделирования при

проектировании и эксплуатации шахт и рудников – это проведение расчётов для всех возможных ситуаций, выбор безопасных, обоснованных решений по управлению проветриванием, дегазацией и газоотсосу.

Изучаемая мультисплит система относится к классу больших систем [226]. На всех этапах её развития существуют особенности, связанные: со сложностью структуры и алгоритмов поведения системы при различных условиях; стохастичностью её характеристик; большим количеством взаимосвязанных параметров; неполнотой и неточностью получаемой исходной информации. Сложные системы имеют иерархическую структуру.

Используя общие принципы моделирования при проектировании и при исследованиях больших систем [226] каждый объект подразделяется на подсистемы в соответствии со своей иерархией. Для каждой локальной подсистемы должны быть решены задачи внешнего и внутреннего проектирования, т.е. макропроектирование и микропроектирование соответственно.

При макропроектировании создаётся виртуальный аналог обобщенной модели процесса проветривания шахты или рудника в целом. Цель данного этапа – оценить правильность выбранной стратегии по основополагающим моментам вентиляции (способ и схема проветривания, способ управления газовыделением, системы контроля и управления проветриванием). Данный этап должен учитывать влияние внешней среды на виртуальный аналог. Это позволит учесть климатические условия, в которых расположена шахта или рудник. На этой стадии макропроектирования производится учёт совместной работы всех источников тяги: вентиляторов главного проветривания; сопутствующей (предварительной) и последующей дегазации пласта, спутников, вмещающих пород и выработанного пространства; газоотсасывающих систем (например, с использованием газодренажных выработок).

При микропроектировании создаются виртуальные аналоги подсистем. К подсистемам, как сообщалось ранее, относят отдельные элементы шахтной

вентиляционной сети – выемочные и проходческие участки, камеры, выработанное пространство и т.п. Цель микропроектирования может быть различной в зависимости от поставленных задач: выбор схемы или способа проветривания; определение мест выноса пожарных газов с целью контроля возникновения эндогенных пожаров (о чём подробно написано в монографии [95]); разработка мероприятий по уменьшению негативного влияния естественной тяги и др.

Виртуальный аналог реализуется на компьютере (рабочих станциях или суперкомпьютерах) в зависимости от объёма информации и поставленных целей. Он воспроизводит поведение мультисплит-системы с учётом внутренних и внешних взаимосвязей. В процессе эксплуатации предприятия виртуальные аналоги систематически должны обновляться с учётом динамики развития горных работ.

Мультисплит система развивается по мере жизненного цикла горного предприятия, эволюционирует из-за появления и внедрения новых средств контроля параметров рудничной атмосферы, накопления баз данных и статистической информации об объекте исследования. В таких условиях только моделирование позволит среди многочисленных вариантов выбрать оптимальный. При этом определяющие факторы могут быть заложены как параметры и определяться автоматически без участия человека, путём перебора всех возможных вариантов.

Основополагающие принципы системного подхода заключаются в следующем:

- 1) модель создаётся последовательно по этапам включая, дополнительные объекты, после того как на предыдущей стадии моделирования были получены результаты, удовлетворяющие критериям проектирования мультисплит-систем;
- 2) используемая информация (исходные данные), получаемая в результате расчётов при моделировании, должна быть согласованной и не

противоречащей физическому смыслу рассматриваемых явлений и системе принятых критериев;

- 3) порядок проведения моделирования должен обеспечивать целостность структуры проектируемой системы, т.е. получаемые данные в решении задач по объектам (подсистемам) должны использоваться как граничные и/или начальные условия в последующих расчётах.

4.5. Порядок системного проектирования вентиляции горных предприятий

Для реализации системного проектирования вентиляции шахт и рудников должна быть определена последовательность создания виртуальных аналогов подземных аэрогазодинамических систем, последующего моделирования и принятия проектных решений.

Системный подход предусматривает две стадии: макропроектирование и микропроектирование.

На первой стадии на основе данных по предпроектной документации, полученной от проектных, консалтинговых и других организаций, а также по результатам изыскательских работ формируется модель внешней среды. На данном этапе определяются ограничения к параметрам мультисплит-системы и к моделям. Здесь же определяются критерии, позволяющие оценить виртуальный аналог адекватности получаемых решений, так как процесс верификации не может быть организован, пока нет реального объекта исследования.

Созданные модели системы и внешней среды образуют мультисплит систему на основе критериев адекватности и эффективности её функционирования. При моделировании определяют стратегию дальнейшего проектирования вентиляции горного предприятия.

На второй стадии приступают к моделированию локальных объектов мультисплит-системы. При этом оцениваются возможности по вычислительным ресурсам, имеющемуся времени на проведение

моделирования и проработки различных сценариев развития процессов проветривания.

Создание трёхмерного виртуального аналога подземной аэрогазодинамической системы также относится к числу системных задач. Большие мультисплит системы создаются на основе значительного объёма исходных данных относительно параметров горных выработок и оборудования, применяемого для добычи, проходки, крепления, транспортировки; свойствам разрабатываемого полезного ископаемого, вмещающих пород и т.д.

Этап проектирования и необходимая детализация виртуальных аналогов зависят от поставленных задач. Оптимальным является следующий порядок выбора этапов проектирования:

- 1) производится макропроектирование на основе геологоразведочных данных и предварительных вариантов разработки месторождения, концептуально решаются вопросы по выбору системы вскрытия, подготовки и разработки месторождений с учётом безопасности ведения горных работ по факторам, зависящим от проветривания;
- 2) при условии отсутствия возможности выполнения требований Правил безопасности аэродинамическим способом на уровне макропроектирования производится моделирование вентиляции совместно с дегазацией и/или газоотсосом;
- 3) после макропроектирования или параллельно с ним производится микропроектирование отдельных подсистем. Создание виртуальных аналогов и моделирование с необходимой детализацией применяется для решения конкретных задач по выбору оптимальных вариантов с учётом критериев, установленных Правилами безопасности, экономическими соображениями в условиях имеющейся исходной информации.

Таким образом порядок системного проектирования включает: создание виртуального аналога; выработку стратегии проведения расчётов; определение критериев эффективности получаемых решений; установление управляющих параметров, изменение которых приводит к увеличению положительного

эффекта – снижению аэрологического и профессионального риска, повышению уровня аэрологической безопасности при минимизации экономических затрат с учётом всех взаимовлияющих факторов.

4.6. Информационные основы систем проектирования шахтной вентиляционной сети

Реализация системного проектирования в зависимости от поставленных целей и объема информации требует значительных вычислительных ресурсов. При увеличении вычислительных мощностей расширяются возможности моделирования при проектировании вентиляции горных предприятий. Однако, для системного проектирования требуются специализированные вычислительные центры, так как иметь на горных предприятиях суперкомпьютеры экономически нецелесообразно (например, базовая стоимость суперкомпьютера «Ломоносов» в МГУ – 2,67 млрд. рублей, без учёта затрат на обслуживание).

Создание виртуальных аналогов – сложная работа, которую могут выполнить только в специализированных коллективах. При этом проектировщикам-исследователям нужен доступ к информации об объекте проектирования (базы исходных данных). Поэтому необходимо создание информационно-диалоговых систем (центров), позволяющих одновременно, в том числе и удалённо, работать неограниченному числу специалистов-проектировщиков. Также необходимо обеспечить защиту информации от несанкционированного доступа.

В таком центре автоматически должен формироваться банк данных, состоящий из:

- 1) справочных данных по свойствам горных пород, физическим и химическим параметрам рудничной атмосферы, параметрам работы горной техники и т.д., доступным всем пользователям центра;

- 2) служебных данных, для гибридных систем, доступных только тем, у кого есть право доступа к такой информации;
- 3) учебных материалов, например, видео-лекций, презентаций, скринкастов, учебно-методической литературы и т.п., доступных всем пользователям центра;
- 4) базы данных моделирования и принятых в проект моделей виртуальных аналогов с исходными параметрами и выходными данными, доступных всем пользователям центра;
- 5) данных с верификации – результатов натурных и лабораторных экспериментов с сохранением интеллектуальных прав, доступных всем пользователям центра.

Схематично алгоритм пополнения и работы с банком данных представлен на рисунок 4.8.

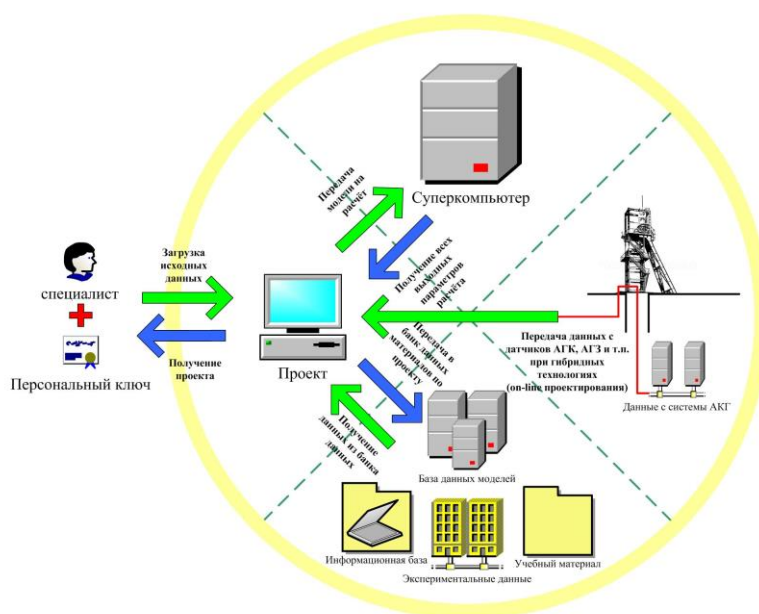


Рисунок 4.8 – Схема сбора, накопления и использования информации по системному проектированию

Наличие центра позволит создать единое информационное поле для системного проектирования вентиляции шахт и рудников. В центре также должна проводиться подготовка специалистов по системному проектированию.

При ведении горных работ уточняются горно-геологические условия, внедряется новая техника, меняются схемы ведения горных работ, корректируются экономические показатели и т.д. Все эти изменения не учитываются первоначальным проектом на ведение горных работ. Согласование с надзорными органами и расчёты по этим изменениям производятся непосредственно на горных предприятиях собственными силами. Часто происходят существенные изменения по принятым ранее решениям в проекте. При изменении параметров ведения горных работ требуется оперативно корректировать параметры проветривания, заложенные изначально.

Поэтому вторым направлением по внедрению методологии системного проектирования, основанного на мультисплит-системах, является подготовка специалистов горных инженеров-проектировщиков. Их задача в процессе ведения горных работ – оперативное планирование развития горных работ на основе созданных и поддерживаемых виртуальных аналогов шахтной системы вентиляции.

Выводы

Новое представление проекта проветривания горных предприятий обуславливается тем, что актуальность системного проектирования сложных аэрогазотермодинамических процессов с учётом изменяющихся параметров с каждым годом возрастает. Возможности современных информационных технологий в горном деле далеко не исчерпаны, а в главных системных решениях – не задействованы вовсе.

Данная проблема постепенно решается в горно-металлургической промышленности отдельных стран, в других странах она фактически не поставлена на должном уровне. Дорожными картами развития горного дела за рубежом её предполагается решить в период с 2020 по 2025 гг. запуском моделей управления интегральными горными системами в режиме «on-line».

Системное проектирование вентиляции горных предприятий включает пространственные модели с геометрическими характеристиками объекта (статическая и динамическая структуры, формирующие границы протекания аэрогазодинамических процессов) и объёмные модели движущихся потоков газовой смеси, используемые фундаментальные законы физики, что позволяет с высокой точностью проводить расчёты, визуализировать распределение давления, скоростей и концентраций вредных и опасных примесей в объёме горных выработок и в выработанного пространства.

Порядок проектирования вентиляции горных предприятий должен предусматривать:

- создание виртуального аналога;
- выработку стратегии проведения расчётов;
- определение критериев эффективности получаемых решений (верификация);
- установление управляющих параметров;
- выработка проектных решений по проветриванию горных предприятий и горных выработок.

Системное проектирование вентиляции горных предприятий позволит на новом уровне обеспечить государственную экспертизу проектов вентиляции шахт и рудников, а также расследование причин аварий, инцидентов и оптимизировать процесс ликвидации их последствий.

Практическая реализация системного проектирования вентиляции горных предприятий требует соответствующего организационно-технического обеспечения путём создания расчётного аналитического центра, оснащённого суперкомпьютерами и службой технической поддержки. На горнодобывающих предприятиях (в отделах или на проектно-технических участках) для обеспечения систематической верификации моделей, а также для сопровождения проектов на каждом горном предприятии должны быть специально подготовленные кадры.

Системное проектирование отличается от существующего проектирования следующими признаками:

- 1) для системного проектирования требуется больше исходных данных для решений, чем при обычном проектировании. Одной из основных задач, является получение этих данных и их уточнение в процессе ведения горных работ;
- 2) системное проектирование решает задачи с большим объёмом вычислений. Для данной работы необходимо подготовить специальные кадры горных инженеров-проектировщиков, которые будут работать на горных предприятиях, а вычисления производить удалённо на суперкомпьютере. Задача данных специалистов – оперативное планирование (текущее проектирование), поддержание моделей виртуальных аналогов предприятий, т.е. корректировка моделей в процессе ведения горных работ;
- 3) при системном проектировании проверяется совокупность решений и оценивается аэрологическая безопасность каждой горной выработки, при этом обеспечивается оптимизация режимов вентиляции по участкам и в шахте в целом.

Разработанная методология системного проектирования вентиляции шахт и рудников решает одну проблему современной науки в области обеспечения безопасности и эффективности горных работ путём применения современных информационных технологий.

ГЛАВА 5. МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ – ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ

5.1. Методологические основы системного проектирования вентиляции горных предприятий

Под методологией системного проектирования вентиляции горных предприятий будем понимать совокупность методов применения системного мультисплит подхода при моделировании и выборе оптимальных решений по проветриванию, обеспечивающих безопасность ведения горных работ. Моделирование, как инструмент проектирования, включает в себя как расчёты конкретных параметров, так и исследования диапазонов их изменения в динамично меняющихся внешних условиях [100]. Это позволяет выявить оптимальные значения искомых параметров с учётом максимального возможного числа взаимодействующих внутренних и внешних факторов как в штатных, так и в аварийных режимах [198].

Необходимость системного проектирования вентиляции шахт обусловлена высокой интенсивностью ведения горных работ и связанных с этим высокими темпами изменения состояния свойств горного массива. Другими словами, исходные данные для проектирования вентиляции существенно меняются в течение относительно короткого периода времени. Также меняются технологические параметры ведения горных работ. Это требует изучения объекта в рамках мультисплит-системы, т.е. не изолированно, а во взаимодействии с внешней средой и внутренними подсистемами [347]. Системный подход решает задачу построения сложной многофакторной мультисплит-системы на всех этапах проектирования, а также поддержания модели в процессе эксплуатации предприятия для управления аэрологической безопасностью. В её основу положен комплексный подход по выбору видов моделирования мультисплит систем, представленный схематично на рисунок

5.1. В основе комплексного подхода по выбору видов моделирования лежит классификация, предложенная Б.Я. Советовым и С.А. Яковлевым [226].

Методология системного проектирования вентиляции горных предприятий, базирующаяся на моделировании мультисплит-систем, может включать стохастическое моделирование, учитывающее вероятностные процессы и события. Например, для условий рудничной вентиляции это могут быть аварийные или технологические остановки вентиляторов, резкие скачки атмосферного давления и т.п. Изменение параметров во времени при проветривании учитывается динамическим моделированием. Все рассматриваемые процессы также непрерывны во времени.

Новым, принципиально отличающимся, является вид моделирования – мысленно-реальное моделирование. Он учитывает различные виды моделирования мысленного, применяемого для сложных процессов и явлений, и реального, применяемого в предлагаемой методологии для верификации моделей математических. Использование любых графических компьютерных программ, создаются виртуальные аналоги подземных аэрогазодинамических систем, что уже является видом моделирования, позволяющим визуально (наглядно) определять особенности топологии вентиляционной сети. На основе математического моделирования, существенно повышающего точность получаемых решений и позволяющего уменьшить (в идеале убрать вовсе) влияние эмпирических коэффициентов и параметров, аналитическим, имитационным, или комбинируя различные виды моделирования, решаются задачи системного проектирования вентиляции шахты или рудника. При аналитических видах используются зависимости, описывающие процессы и явления, происходящие с рудничной атмосферой как стационарные, так и динамические. Имитационное моделирование позволяет так же воспроизвести процесс во времени и, кроме того, наглядно «увидеть» любой отдельный параметр, увязанный в единую математическую модель. Проектировщики могут рассмотреть различные варианты протекания процессов проветривания

во времени с изменением управляющих параметров. Здесь же можно автоматически задать определение требуемых параметров системы.

Схематично методологический подход системного проектирования представлен на рисунке 5.2.

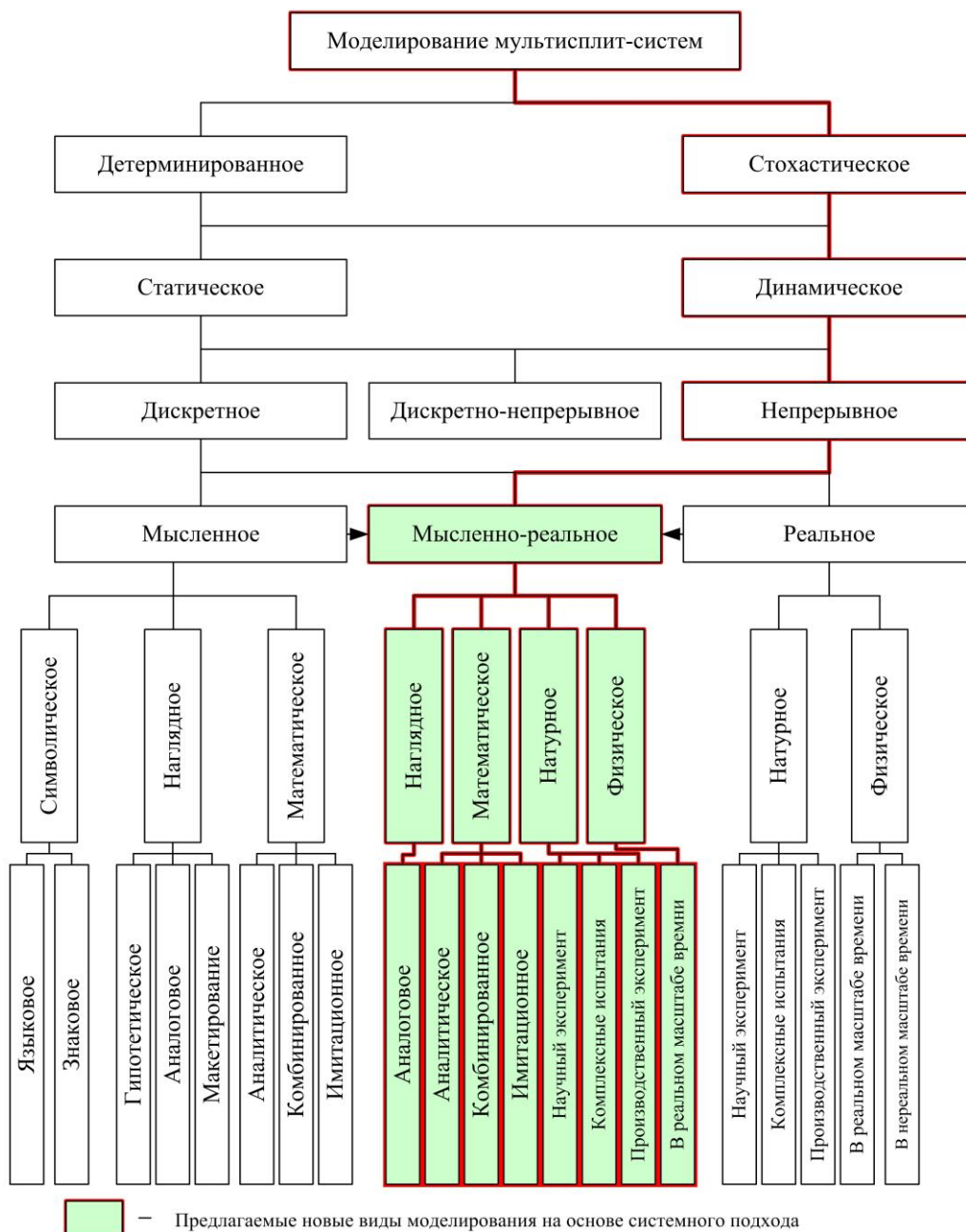


Рисунок 5.1 – Классификация видов моделирования мультисплит-систем

Методология системного проектирования вентиляции горных предприятий включает: принципы, порядок, формирование базы исходных данных, модели и алгоритмы.

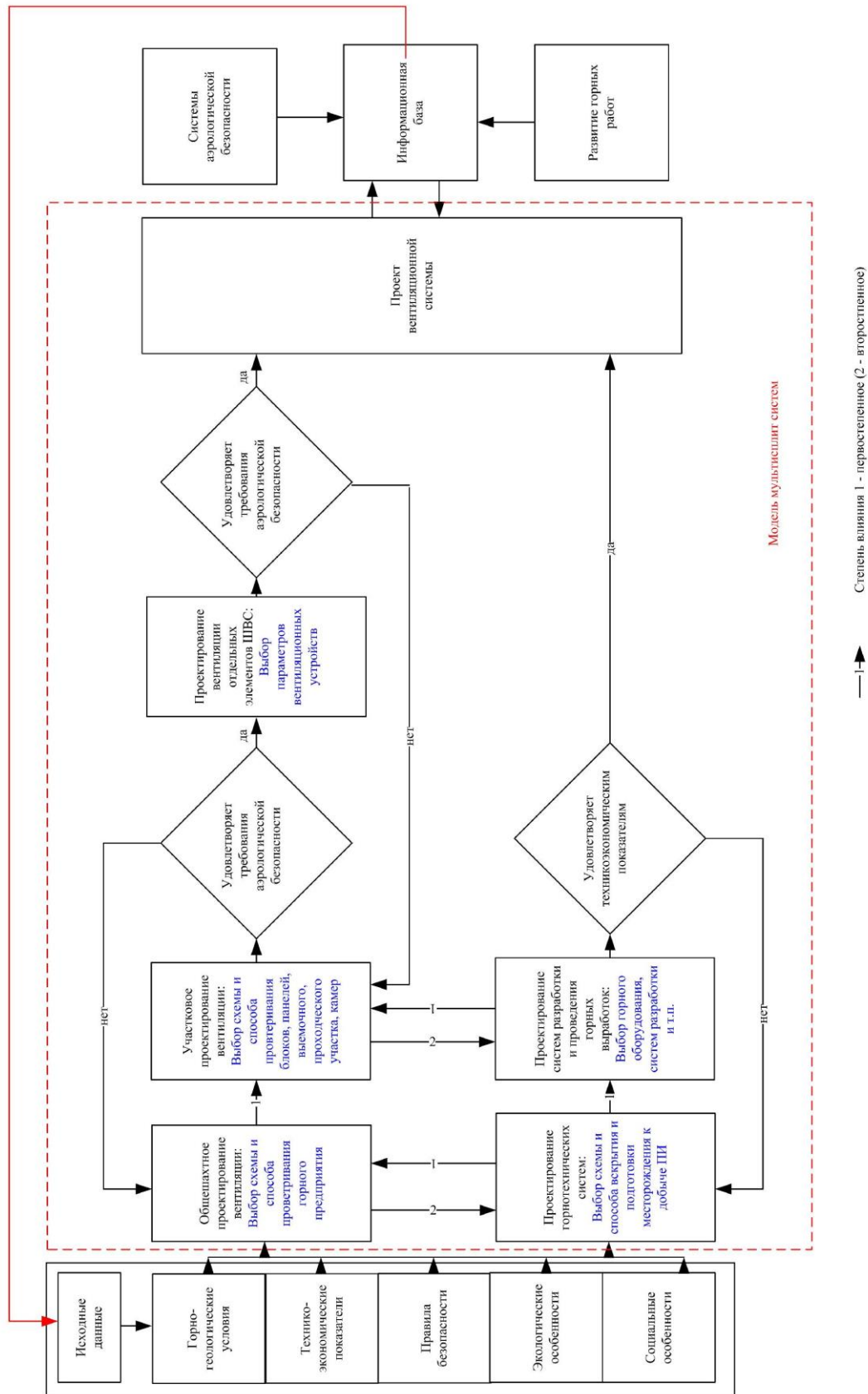


Рисунок 5.2 – Системное проектирование вентиляции во взаимосвязи с горнотехнической системой

5.2. Формирование исходных данных при системном проектировании вентиляции шахт

Исходные данные для системного проектирования вентиляции шахт на первоначальном этапе получают, отталкиваясь от технико-экономических требований, горно-геологических сведений, требований безопасности.

Исходные данные можно классифицировать следующим образом:

- 1) по группам исходных данных (горно-геологические, технологические и организационные);
- 2) по видам исходных данных (базовые и дополнительные);
- 3) по этапам проектирования (1 этап – общешахтное проектирование вентиляции; 2 этап – участковое проектирование вентиляции; 3 этап – проектирование проветривания отдельных объектов шахтной вентиляционной сети).

По первому признаку к группе горно-геологических исходных данных относятся: состав горных пород; температурные характеристики горного массива; газоносность; фильтрационные характеристики пород и выработанного пространства (пористость, макрошероховатость, проницаемость) и т.д.

К технологическим исходным данным относятся: геометрические размеры горных выработок (длины, уклоны, сечения, форма, шероховатость); тип крепит; порядок и направление отработки выемочных столов; данные по применяемому оборудованию (габариты, значения по тепло- и газовыделению, параметры работы горнодобычной и проходческой техники); параметры вентиляционных устройств (скорость движения воздуха (расход воздуха), давление, температура, состав газов поступающих в рудничную атмосферу и т.п.).

Данные по оборудованию принимаются согласно техническим паспортам.

К организационным исходным данным относят: планограммы организации технологических процессов в очистных и проходческих забоях; план-график и схемы движения машин с двигателями внутреннего сгорания и т.д.

В расчёте принимаются максимально возможные диапазоны варьирования параметров с двукратным запасом, например, если при планах буровзрывных работ предполагаемое количество взрывчатых веществ (ВВ) на стадии проектирования равно 100 кг, то в расчётах также рассматривают варианты с диапазоном изменения объёма ВВ до 200 кг. Это позволит учесть возможные изменения условий в будущем, чтобы обеспечить резерв пропускной способности вентиляционной сети. Такой подход к выбору исходных данных используется для каждой группы.

По второму признаку исходные данные условно можно разделить на базовые (расчёт без которых не возможен) и дополнительные (позволяющие на более детальном уровне выбрать оптимальный режим проветривания в привязке к принятым технологическим решениям). Геометрические параметры горных выработок по группе относятся к техническим, по виду – к базовым и учитываются на всех этапах проектирования вентиляции.

В процессе ведения горных работ все параметры уточняются и расчёт корректируется.

На первом этапе используются параметры горных выработок – длины, сечения, форма, топология (взаимное трёхмерное расположение выработок относительно друг друга). На основе планов ведения и развития горных работ с учётом применяемых способов и методов управления газовыделением создаётся виртуальный аналог подземной аэрогазодинамической системы: горные выработки – выработанное пространство. Дополнительные данные относятся к локальным объектам: учитываются параметры выработанных пространств, высота обрушенных и нарушенных ведением горных работ пород; дренажных выработок, применяемых для газоотсоса; дегазационных скважин и др. Все размеры горных выработок, их уклоны, параметры выработанного

пространства, сохраняются в трёхмерной системе координат в реальном масштабе.

Для второго этапа проектирования проветривания (участковое проектирование вентиляции) масштаб детализовки – средний. Здесь основной задачей является определение оптимального расположения горного оборудования и вентиляционных устройств (вентиляторов местного проветривания, воздуховода и т.д.).

На третьем этапе проектирования вентиляции (проектирование проветривания отдельных объектов шахтной вентиляционной сети) прорабатываются вопросы по повышению безопасности ведения горных работ по аэрологическим факторам на локальных участках (в призабойной части, в очистном забое, в кутках, в камерах, на отдельных участках горных выработок, в местах со сложными соединениями и т.п.). На данном этапе прорабатывается также работа вентиляционных устройств и оборудования для проветривания (эжекторы, air mover, вентиляторы местного проветривания и т.д.) и контроля параметров рудничной атмосферы (например, определяются места установки стационарных систем и датчиков контроля параметров атмосферы). Данный этап характеризуется минимальным масштабом детализовки.

Этапы проектирования следуют друг за другом. При этом, если на следующем этапе (после перебора всех возможных вариантов топологии, расположения оборудования, режимов проветривания и т.д.) не обеспечивается аэрологическая безопасность (критерием которой являются нормы, прописанные в Правилах безопасности, Руководстве и других нормативных и проектных документах – скорость движения воздуха, концентрация газов, температура, предельная депрессия и т.д.), то проектировщику необходимо вернуться на предыдущий этап.

Для каждого этапа системного проектирования вентиляции шахт принципиальным отличием является расчётный масштаб. Для первого этапа проектирования (общешахтное проектирование вентиляции) масштаб детализовки – укрупнённый. То есть на данном этапе проектирования не

учитываются места расположения горного оборудования, некоторых вентиляционных устройств (вентиляторов местного проветривания, расположение воздухопроводов). Основной задачей на данной стадии системного проектирования, наряду с применением всех традиционных методов расчёта параметров проветривания (например, составление аэродинамической схемы), является выбор оптимального воздухораспределения по сети горных выработок, утечек и подсосов воздуха в выработанном пространстве с учётом совместной работы вентиляторов главного проветривания, дегазации и газоотсоса.

Источником корректировки исходных данных должны стать все службы горных предприятий (геологическая, маркшейдерская, участки проходки и добычи, дополнительные (внепроизводственные) службы метеонаблюдений и т.п.). Получаемая ими информация должна поступать в единую базу исходных данных. По вновь полученным, уточнённым данным оперативно (в течение 24 часов) должны выполняться перерасчёты в проекте проветривания. Так контроль состояния выработок (форма их сечения и периметр) осуществляют маркшейдерские службы. При получении ими инструментальных замеров об изменении параметров относительно проектных (например, по причине старения горных выработок, перекрепления [237] и т.п.) они обязаны отобразить их в CAD-системе, используемой на предприятии (например, AutoCAD).

Данные со стационарных и/или переносных систем контроля скорости движения воздуха, концентрации газов, температуры, влажности также должны использоваться в системном проектировании вентиляции для верификации моделей и поддержания их адекватности.

Таким образом, обеспечивается многофакторный контроль параметров рудничной атмосферы и формирование базы исходных данных для управления вентиляцией и оперативного планирования развития горных работ, что существенно повышает безопасность по аэрологическому фактору.

5.3. Модели аэрогазотермодинамических процессов при системном проектировании вентиляции шахт

Модель представляет собой виртуальный аналог подземной аэрогазодинамической системы, включающей систему горных выработок и выработанное пространство [72]. При исследовании влияния процессов движения воздуха, газовой смеси в вентиляционных устройствах в модель включаются технические устройства (вентиляторы, эжекторы, дегазационный трубопровод и т.д.). Процессы движения воздуха в них рассматриваются как отдельно от горных выработок и выработанного пространства, так и совместно.

5.3.1. Виртуальные аналоги объектов систем вентиляции

Виртуальный аналог подземной аэрогазодинамической системы используется для получения информации о реальной системе проветривания горного предприятия. При системном проектировании абстрактное мышление проектировщика заменяется конкретным численным значением, полученным в результате расчёта математической модели. Математическая модель включает дифференциальные уравнения, описывающие процессы проветривания.

В применяемом сегодня способе проектирования вентиляции (классический или индуктивный подход) виртуальный аналог представлен компьютерной моделью, состоящей из ветвей и узлов (рисунок 5.3). Объёмные горные выработки различной формы и размеров заменяются линиями с заданными не изменяющимися во времени параметрами (длина, периметр, площадь сечения, коэффициент аэродинамического сопротивления трения). Движение в них однонаправленно. Диффузия, распределение тепла, противотоки в них не рассматриваются. Разбавление газов в них происходит по правилу вытеснения (перенос) или смешения [130]. При проектировании вентиляции на стадии расчёта необходимого количества воздуха вводится

допущение о мгновенном разбавлении вредных и опасных газов до нормируемых значений.

Модель дополняется уравнениями Kirchhoff'a [318] и решается методом М.М. Андрияшева [4], Н. Cross'a [298]. Использование способа численного моделирования внедрено повсеместно и широко используется во всём мире для расчёта воздухораспределения и локальных задач рудничной аэрогазодинамики.

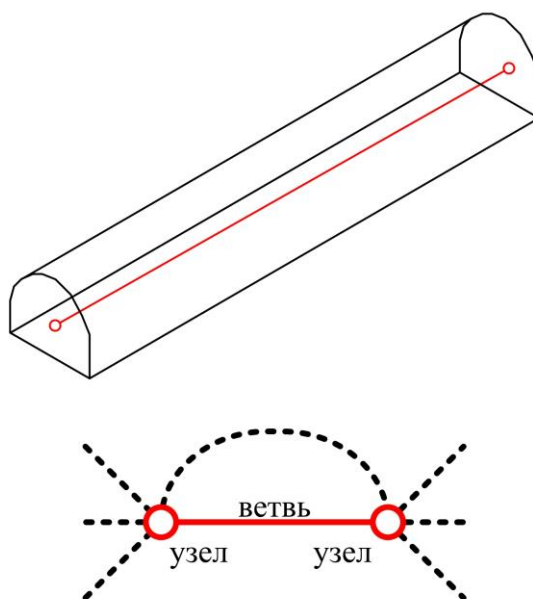


Рисунок 5.3 – Виртуальный аналог (модель) шахтной вентиляционной сети при классическом подходе в проектировании проветривания горных предприятий

При системном проектировании вентиляции шахт используют модели (виртуальные аналоги), составленные из объёмных горных выработок и выработанного пространства. Для визуального сравнения на рисунке 5.4 представлено два варианта: 1) активно применяемая модель для численного решения задач по аэрогазодинамике, основанная на «силовой» математической теории и 2) зарождающаяся модель для численного решения задач по аэрогазодинамике на более детальном уровне, основанная на «кинетической теории газов».

Оба представленных варианта моделей системного проектирования вентиляции горных предприятий отличаются математическим подходом,

применяемом при решении задач рудничной аэрогазодинамики. При этом математическая модель по «силовой» теории, основанной на решениях уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу, методом конечных объёмов, подробно описана как в отечественной [44, 84, 94, 152], так и в зарубежной литературе [291, 361, 362, 357]. Математическая модель на основе кинетической теории газов применительно к рудничной аэрогазодинамике в третьей главе.

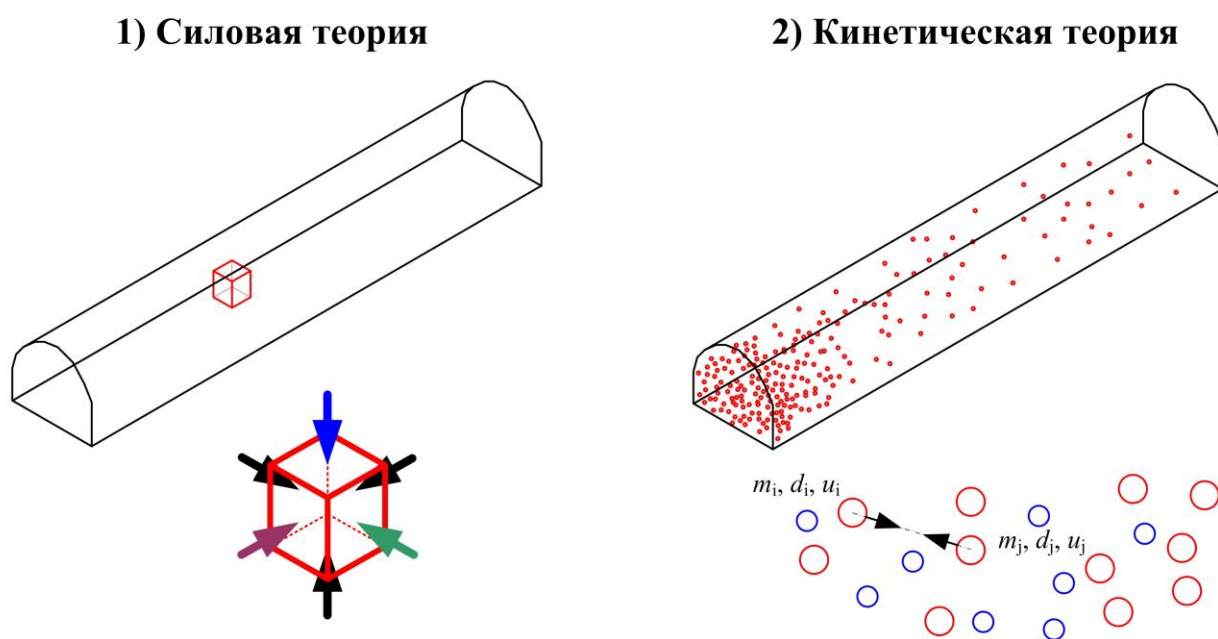


Рисунок 5.4 – Виртуальный аналог (модель) при системном проектировании вентиляции горных предприятий

В обоих случаях решение осуществляется с применением метода конечных элементов. После создания трёхмерной модели проектируемого объекта осуществляется выбор математической модели, моделей турбулентности, ввод начальных и граничных условий, построение разностной сетки, организация итерационного процесса (запуск решения), обработка и анализ полученных данных.

Следовательно, виртуальный аналог подземной аэрогазодинамической системы включает трёхмерную геометрическую модель проектируемого объекта, математическую модель, описывающую процессы тепломассопереноса

и краевые условия. С учётом того, что целый ряд параметров меняется постоянно во времени, процесс решения принимает циклический характер.

Для создания виртуальных аналогов могут быть использованы компьютерные программы AutoCAD, Workbench Ansys, Kompas-3D, SolidWorks, Inventor, Pro/ENGINEER и др.

5.3.2. Реализация силовой математической модели программного комплекса Ansys CFX

Существующие программные комплексы, позволяющие реализовать разработанную методологию, базируются на силовой теории тепломассопереноса, поэтому в данной работе соответствующие модели и алгоритмы разработаны с учётом этой теории. Наиболее распространённой из всех программных систем является Ansys [292]. Следующие далее решения по созданию моделей и заданию краевых условий базируются на реализованных в данной программе модулях. Решение задач аэрогазодинамики горных предприятий осуществляется с учётом течения многокомпонентного газа. Течение рассматривается как вязкое, т.е. при движении газоздушных смесей за счёт внешнего и внутреннего трения происходит потеря движущей энергии (работа переходит в тепло). В «силовой» теории движения газов, реализованной в существующих программных комплексах и применяемых в настоящее время при системном проектировании вентиляции горных предприятий и подземных сооружений, используют систему уравнений Навье-Стокса

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho u^2) + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(p + \rho v^2) + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v w}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(p + \rho w^2) + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho v w}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (5.1)$$

где t – время, с;

x , y и z – декартовы координаты (координатные оси задаются произвольно проектировщиком на стадии создания компьютерной трёхмерной модели или её загрузки в расчётные программы из графических приложений, используемых на горных предприятиях (например, AutoCAD));

u , v и w – компоненты вектора скорости движения воздуха, м/с;

ρ – плотность воздушной среды, кг/м³;

p – статическое давление воздуха, кг/м², определяемое из соотношения

$$p = R_0 \cdot \rho \cdot T \cdot \left(\frac{1-\gamma}{\mu_1} + \frac{\gamma}{\mu_2} \right); \quad (5.2)$$

T – температура воздушной среды, К;

γ – массовая доля воздуха в смеси (от 0 до 1);

μ_i – коэффициент молекулярной вязкости, Па·с (кг/м·с), $i = 1$ или 2 обозначает воздух или газ (смесь газов);

R_0 – универсальная газовая постоянная, $R_0 = 8,31 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}/(\text{с} \cdot \text{К} \cdot \text{моль})$

τ_{ij} – определяются из соотношений

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= -\frac{2}{3} \cdot (\mu + \mu_T) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2 \cdot (\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial x} \\ \tau_{yy} &= -\frac{2}{3} \cdot (\mu + \mu_T) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2 \cdot (\mu + \mu_T) \frac{\partial v}{\partial y} \\ \tau_{zz} &= -\frac{2}{3} \cdot (\mu + \mu_T) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2 \cdot (\mu + \mu_T) \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = (\mu + \mu_T) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = (\mu + \mu_T) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \tau_{zy} &= \tau_{yz} = (\mu + \mu_T) \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5.3)$$

μ – коэффициент динамической (молекулярной) вязкости, Па·с (кг/м·с);

μ_T – коэффициент молекулярной турбулентности.

$$\mu_T = C_\mu \cdot \rho \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5.4)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия (turbulence kinetic energy) (м²/с²);

ε – скорость диссипации (turbulence eddy dissipation) (м²/с³).

Для учёта турбулентности применяется осреднение искомых параметров по времени. Осуществляется это путём разделения искомых параметров на среднюю величину и пульсационную (осреднение по Рейнольдсу).

$$\begin{aligned} u(t) &= \bar{u}_i + u'_i(t) \\ v(t) &= \bar{v}_i + v'_i(t) \\ w(t) &= \bar{w}_i + w'_i(t) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Система уравнений (5.1) для решения дополняется уравнением вихревой вязкости (уравнение неразрывности)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0. \quad (5.6)$$

и уравнением теплопроводности

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho H - p) + \frac{\partial \rho u H}{\partial x} + \frac{\partial \rho v H}{\partial y} + \frac{\partial \rho w H}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(u \tau_{xx} + v \tau_{yx} + w \tau_{zx} + k_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{zy} + k_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz} + k_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (5.7)$$

где H и k_{Σ} определяются по формулам

$$H = h + \frac{1}{2} \cdot (u^2 + v^2 + w^2). \quad (5.8)$$

$$k_{\Sigma} = C_p \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right). \quad (5.9)$$

где h – удельная энтальпия среды, Дж/моль, рассчитывается по формуле

$$h = \int_{T_0}^T C_p(T) dT + h_0; \quad (5.10)$$

C_p – удельная теплоёмкость среды при постоянном давлении, для смеси рассчитывается по формуле

$$C_p = (1 - \gamma) \cdot C_{p1} + \gamma \cdot C_{p2}; \quad (5.11)$$

Pr – ламинарное число Прандтля;

Pr_T – турбулентное число Прандтля.

Для вычисления турбулентных характеристик систему уравнений (5.1), (5.5) и (5.6) необходимо дополнить моделями турбулентности.

5.3.3. Моделирование турбулентности

Для численного решения системы дифференциальных уравнений требуется дополнить математическую модель зависимостями, описывающими процесс перехода энергии от одних частей пространства к другим, другими словами, к определению параметров k и ε . Для описания этого процесса применяют различные зависимости, называемые моделями турбулентности, основные из них по данным [43] приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Модели турбулентности

№	Наименование модели	Автор модели
1	The Zero equation	Chen и Xu
2	Standard k - ε	Launder B.E., Spalding D.B. [320]
3	Realizable k - ε	Shih C., Lourenco L. [323]
4	LRN-LS	Launder B.E., Sharma
5	LRN-JL	Jones, Launder B.E.
6	LRN-LB	Lam аи Bremhorst
7	LRN k - ω	Wilcox D.C. [365]
8	SST k - ω	Menter F.R. [333, 334]
9	$v2f$ -dav	Davidson L. [302]
10	$v2f$ -lau	Laurence
11	RSM RSM-IP	Gibson и Launder
12	RSM-EASM	Gatski и Speziale
13	SAS DES	Menter F. R. Egorov Y. [335]
14	DES (S-A)	Стрелец М.Х.
15	DES (ASM)	Batten
16	LES-Sm	Smagorinsky
17	LES-Dyn	Germano, Lilly
18	LES-Filter	Zhang и Chen

Для используемых моделей в зависимости от этапа проектирования могут применяться модели турбулентности k - ε (на первом этапе, когда не требуется получение точных решений в пристеночных областях) и SST (на втором и третьем этапе проектирования проветривания). Модель турбулентности SST сочетает в себе две другие часто применяемые модели (k - ε и k - ω), поэтому её рекомендуется применять при проектировании.

5.3.4. Порядок задания краевых условий

Краевыми называют начальные и граничные условия. Начальные условия задаются к поверхности (входные и выходные границы), через которую поступает и выходит воздух (или газовоздушная смесь) в проектируемый объект. Геометрические параметры поверхности задаются на этапе создания трёхмерной модели горного предприятия. К таким поверхностям относят всасывающие патрубки вентиляторов, устья вскрывающих горных выработок и т.д. При анализе схем, способов и режимов проветривания тупиковых горных выработок поверхностями, на которые задаются начальные условия, могут быть выходные отверстия воздухопроводов.

К входным границам задаются начальные условия движения воздуха в проектируемый объект. Проектировщиком задаются вектора скорости движения воздуха (u_0 , v_0 и w_0) или массовый расход воздуха, статическое или полное давление (p_0), температура воздуха (T_0) и концентрация вредных примесей, которая может содержаться в поступающем воздухе (концентрацию газа C в долях или концентрацию пыли D). Данные значения могут задаваться как постоянные во времени

$$u_0 = u_{\infty},$$

$$v_0 = v_{\infty},$$

$$w_0 = w_{\infty},$$

$$p_0 = p_{\infty},$$

$$T_0 = T_{\infty},$$

$$C_0 = C_{\infty},$$

так и любой зависимостью

$$u_0 = f(u),$$

$$v_0 = f(v),$$

$$w_0 = f(w),$$

$$p_0 = f(p),$$

$$T_0 = f(T),$$

$$C_0 = f(C),$$

что позволяет учитывать различные режимы проветривания в одном расчёте, или естественную тягу из-за изменения температуры воздуха на поверхности.

Граничные условия задаются на поверхности, ограничивающей исследуемый объём. При системном проектировании вентиляции горных предприятий поверхностью, ограничивающей рудничную атмосферу, являются почва, кровля и борта горных выработок. Это твёрдые границы, у которых имеются фиксированные значения шероховатости (обуславливающие сопротивление трения), температуры, пыле- и газовыделения.

Шероховатость задаётся в виде пристеночной функции K_s , определяемой по зависимости

$$K_s = l_0 \cdot e^{(k \cdot b)}, \quad (5.11)$$

где l_0 – средний размер выступа, м;

k – постоянная Кармана, $k = 0,4$;

b – параметр, зависящий от профиля скоростей (для логарифмического профиля скоростей $b = 8,5$).

Для учёта сопротивлений трения и лобовых сопротивлений рекомендуется на 2 и 3 этапах системного проектирования вентиляции при создании трёхмерных моделей учитывать элементы конструкций крепи и горного оборудования. Местные сопротивления будут учитываться автоматически, потому что виртуальный аналог подземной аэрогазодинамической системы базируется на трёхмерной модели, выполненной в масштабе 1:1 и включает все виды сопряжений, поворотов и изменений топологии сети.

5.3.5. Построение расчётной сетки

В отличие от классического представления шахтной вентиляционной сети (ШВС) при системном проектировании горные выработки и выработанное пространство состоит из элементов (ячеек), имеющих узлы и грани (рисунок

5.5). Расчёт производится по всем направлениям, между всеми узлами конечных элементов.

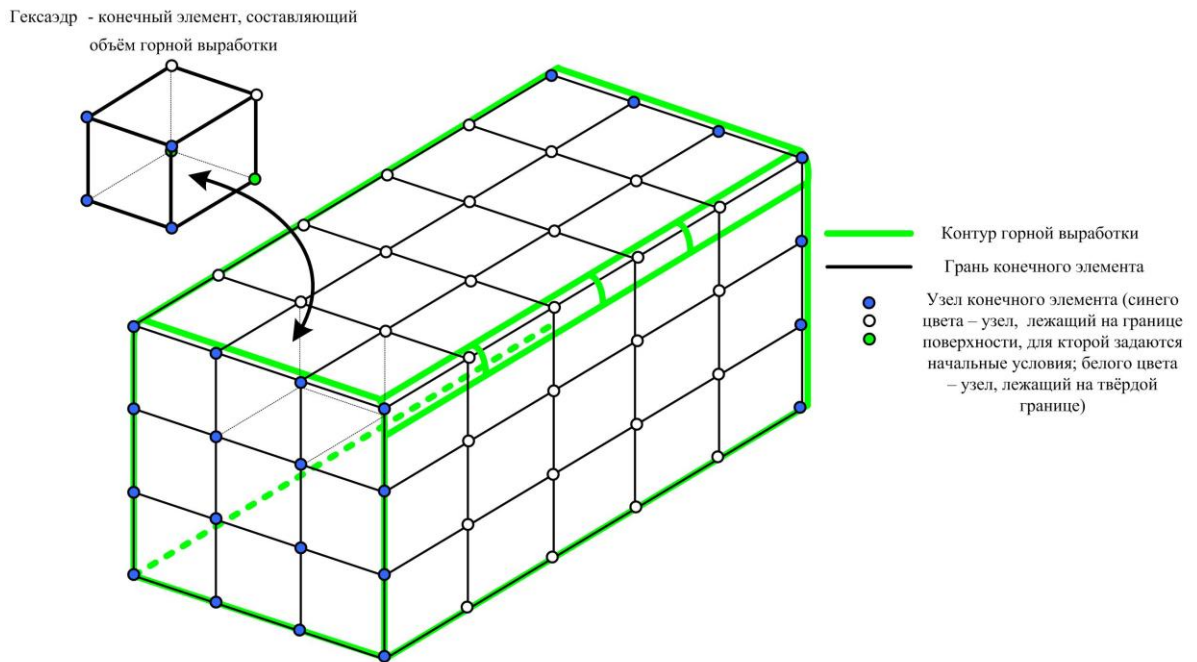


Рисунок 5.5 – Разбиение объёма горной выработки на конечные элементы (гексаэдр)

Конечные элементы создают сложную трёхмерную структуру, которую называют расчётной сеткой. Элементы могут иметь различный вид – четырёхгранников (тетраэдр), шестигранников (гексаэдр), восьмигранников (пирамида) и т.д.

В настоящее время ввиду отсутствия специализированного отечественного программного обеспечения для горных предприятий, позволяющего решать систему уравнений аэрогазодинамики в системе горные выработки – выработанное пространство в их объёме, можно воспользоваться существующим программным обеспечением (например, Ansys CFD или FlowVision). Алгоритм действий при использовании любого аналогичного типа программ будет таким же. В будущем одной из задач в развитии методологии системного проектирования будет разработка и внедрение отечественных программных средств для проектирования вентиляции горных предприятий, с учётом математической модели основанной на кинетической теории газов.

Созданная трёхмерная модель шахты (на первом этапе проектирования) разбивается на простые элементы (из предыдущих работ [69, 93, 107] было показано, что для расчёта аэрогазодинамических процессов наиболее оптимальными элементами ввиду сложной топологии, являются тетраэдры). Длина грани тетраэдров, составляющих объём горных выработок, должна быть не более 0,1 м. Размеры грани выработанного пространства должны быть не более 1 м. При этом для учёта тепловыделений из массива горных пород, в модель подземной аэрогазодинамической системы добавляется массив вмещающих горных пород. Размеры грани тетраэдров массива горных пород рекомендуется выбирать не более 10 метров.

Для системного проектирования на втором этапе размеры граней тетраэдров рекомендуется принимать не более 0,01 м. А на третьем этапе размеры элементов выбираются исходя из задач исследований и получаемых результатов расчёта. Критерием правильного выбора размеров конечных элементов является параметр сходимости $\varepsilon < 10^{-3} - 10^{-4}$.

Генерируемые сетки должны обладать рядом свойств, обеспечивающих возможность проведения расчетов турбулентных течений вязкого газа с числами Рейнольдса $10^{-5} - 10^{-7}$ в пространственных областях достаточно сложной формы. Среди этих свойств отметим следующие:

- 1) для обеспечения разрешения пограничных слоев сетка должна сгущаться к поверхностям жестких стенок, в местах сопряжений, причем размер ячеек разностной сетки вблизи поверхности может достигать величины 10^{-3} и менее гидравлического диаметра;
- 2) сеточные линии одного семейства вблизи поверхностей жестких стенок должны быть близки к нормальям к этим поверхностям; формы ячеек разностной сетки должны быть близки к равностороннему тетраэдру;
- 3) разностная сетка должна быть квазиравномерной в том смысле, что при стремлении количества узлов сетки к бесконечности разность характерных размеров соседних ячеек должна стремиться к нулю быстрее, чем сами эти размеры.

В работе для построения пространственных регулярных сеток была использована «квазитрехмерная» методика, в основе которой лежит построение двумерной невырожденной сетки на поверхности объекта.

5.3.6. Обработка и анализ полученных данных

В результате решения математической модели определяются характеристики потока, относящиеся к конечным объёмам. Для анализа полученных результатов решения необходим переход от значений величины в центрах ячеек к значениям величины в узлах. Для этого предполагается, что значения, приписываемые ячейкам сеточного объёма, соответствуют точке с координатами – средними значениями координат четырех узлов, которые образуют ячейку. Затем для каждого из узлов разностной сетки значения каждой из искомых величин определяются как средневзвешенные значения соответствующих величин из четырех центров ячеек, у которых этот узел разностной сетки входит в число узлов, образующих ячейку

$$f = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 l_i f_i, \quad (5.12)$$

где f_i – значение параметра в i -ой ячейке;

$$l_i^2 = \left(\frac{1}{4} \left(\sum_{j=1}^4 x_j \right) - x^0 \right)^2 + \left(\frac{1}{4} \left(\sum_{j=1}^4 y_j \right) - y^0 \right)^2 + \left(\frac{1}{4} \left(\sum_{j=1}^4 z_j \right) - z^0 \right)^2, \quad (5.13)$$

где x_j, y_j, z_j – координаты j -ого узла i -ой ячейке.

В случае если узел лежит на жесткой стенке без источника газовой выделения, то значение трёх компонент скорости принимается равным нулю.

5.4. Алгоритм системного проектирования вентиляции шахт

Для реализации системного подхода в проектировании вентиляции горных предприятий необходим точный набор инструкций (алгоритм), описывающий порядок проведения расчётов.

Алгоритм является комбинированным (вычислительно-управляющим), что позволяет на основе исходных данных получать конкретные параметры вентиляционных устройств, схем, способов и режимов проветривания. В случае получения информации об изменившихся условиях (при ведении горных работ) в качестве реакции на данное событие происходит корректировка исходных данных, расчётов и самого проекта проветривания (рисунок 5.6).

По времени системное проектирование условно можно разделить на два периода: 1-й на стадии проектирования (без фактического существования предприятия) и 2-й на стадии ведения горных работ. При этом вторая стадия начинается с момента строительства горного предприятия (с достижения отметки котлована на глубине более 10 метров от поверхности) и до завершения добычи полезных ископаемых с последующей ликвидацией. Алгоритм системного проектирования вентиляции при этом остаётся одинаковым (рисунок 5.6).

1-я стадия включает в себя: сбор исходных данных для проектирования; создание трёхмерной модели проектируемого объекта; проведение расчётов и сравнительного анализа различных схем, способов, режимов проветривания и т.д.; выбор проектного решения на основе экономического сравнения вариантов обеспечивающих требуемый уровень безопасности.

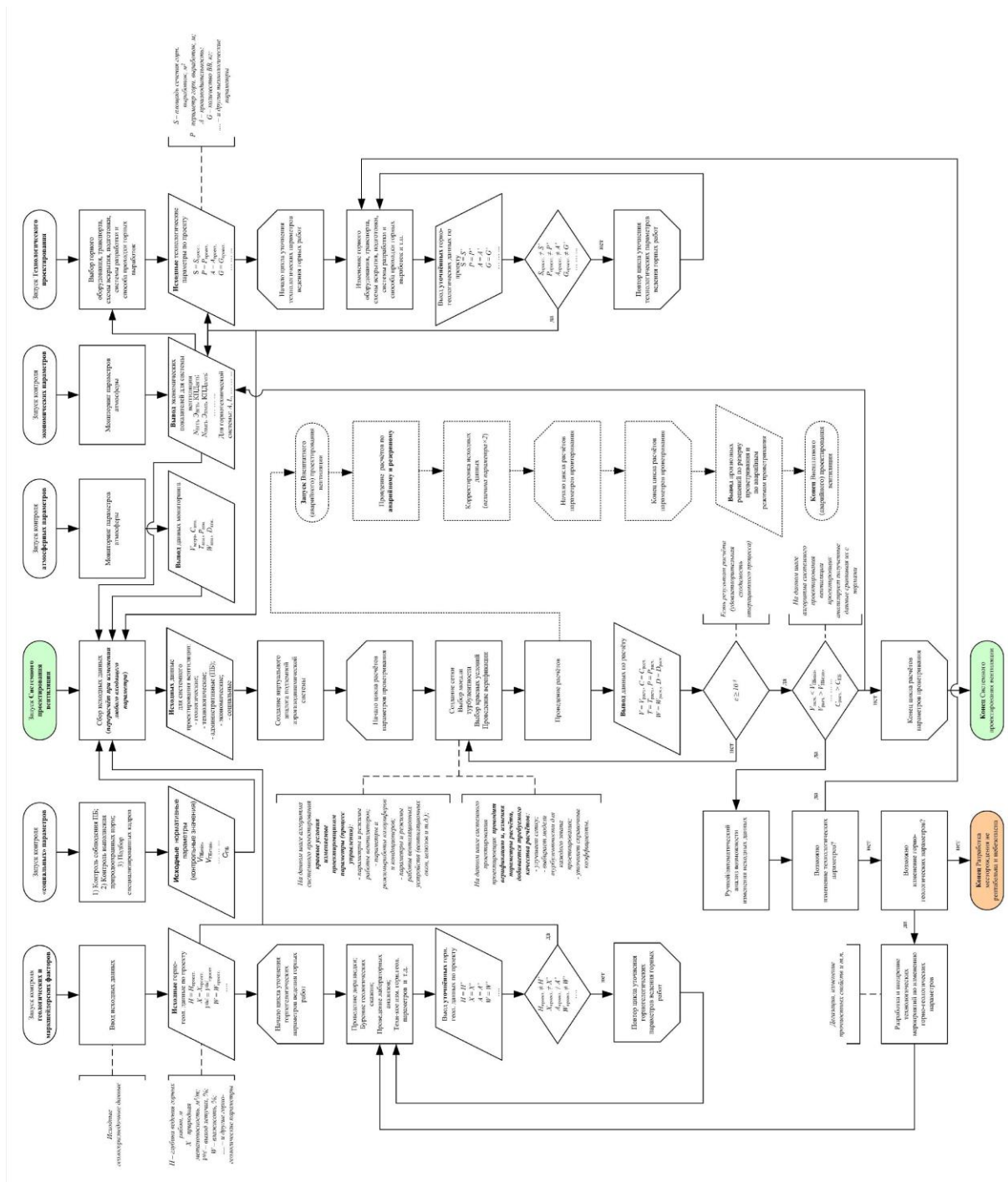
На первой стадии проектирования основными исходными данными являются значения, полученные при геологоразведочных работах. В процессе ведения горных работ, проведения дополнительных исследований при доразведке и т.д. происходит корректировка, уточнение всех горно-геологических параметров.

Также на первой стадии проектирования основными исходными данными являются значения, полученные от служб технологического проектирования. К исходным данным относятся все параметры по схемам вскрытия, способу ведения добычных и проходческих работ, системе разработки, типу и параметрам применяемого горного оборудования (добычного, проходческого, вспомогательного).

На базе исходных данных для системного проектирования формируется модель – виртуальный аналог подземной аэрогазодинамической системы. Поначалу он представлен трёхмерной компьютерной моделью в масштабе 1:1 выполненной в CAD-системе. Набор исходных данных фиксируется в проектном документе или процесс передачи исходных данных в модель автоматизируется.

Далее в Алгоритме включается цикл расчётов параметров проветривания.

Он включает работу проектировщика по 1) созданию расчётной сетки по трёхмерной модели, 2) выбору модели турбулентности 3) по заданию начальных и граничных условий, а также 4) по настройке процесса решателя. В результате расчёта проектировщик получает массив данных по распределению скорости движения воздуха, концентрации газов, давления, температуры, плотности воздуха, коэффициентам турбулентности и вязкости. Все расчётные значения получаются по объёму горных выработок, т.е. в любой точке проектируемого объекта мы получаем интегральное значение интересующего параметра (среднее значение между расчётными вершинами). Распределение параметров анализируется по любому заданному сечению, по изолиниям и изоповерхностям. По исследуемому объёму получают данные по местам с значениями контролируемых параметров выше допустимых норм (например, для газов или максимальной скорости движения воздуха) [75]. При получении удовлетворительного результата (все контролируемые параметры в допустимом диапазоне) расчёт заканчивается и поступает в стадию «работы». При любом изменении производится перерасчёт проекта.



При незначительных изменениях параметров проветривания, в проект вносятся частичные изменения без дополнительных согласований с надзорными органами. При невозможности выполнения критериев (норм Правил безопасности) путём изменения параметров проветривания (изменяя краевые условия) цикл расчётный прерывается и обращается к возможности изменения исходных параметров по другим видам деятельности горного предприятия. Например, изменение технологии ведения горных работ (изменение топологии ШВС, увеличение сечений выработок, изменение типа применяемого ВВ и т.д.) или изменение геологических параметров (снижение газоносности путём применения дегазации) и т.д.

Таким образом, происходит учёт взаимного влияния всех процессов при ведении горных работ с проектированием вентиляции.

На стадии проектирования до начала строительства и эксплуатации горного предприятия по метеонаблюдениям в районе расположения шахты определяют возможные диапазоны температуры и влажности атмосферного воздуха, атмосферного давления и природных источников пылегазовых загрязнений. По полученным крайним и средним значениям производится расчёт параметров проветривания.

Все решения проверяются экономическими службами с целью выбора наиболее оптимального варианта по затратам на закупку и эксплуатацию вентиляционного оборудования. Ими производится расчёт рентабельности и себестоимости ведения горных работ по предлагаемым системным решениям. Значения экономических показателей (например, потребляемая мощность (N , кВт), коэффициент полезного действия (КПД), эксплуатационные затраты на ремонт (\mathcal{E} , руб.) и т.д.) для сравнения различных вариантов получают после проведения серии расчётов по проветриванию. При необходимости вносятся изменения в проектные решения.

После того как выбраны оптимальные решения реализуется проект проветривания. С момента начала строительства или эксплуатации горного предприятия 1-я стадия переходит во 2-ю. Алгоритм отличается добавлением

оперативного управления и контроля проектных решений по вентиляции. В алгоритме системного проектирования проветривания шахты на 1-й стадии принимают участие все проектные отделы, а на 2-й стадии строительства и эксплуатации – все службы горного предприятия.

За поддержание модели горного предприятия (виртуального аналога) с учётом топологии сети отвечают все службы горного предприятия. Маркшейдерскими службами предоставляется информация для пополнения и корректировки в графических компьютерных программах (например, AutoCAD или Компас – 3D) трёхмерных моделей горного предприятия.

Проектным отделом, занимающимся вопросами вентиляции, от геологических, технологических и экономических служб осуществляется сбор и подготовка исходных данных для системного проектирования. В этом заключается одно из отличий от принятого сегодня порядка проектирования вентиляции.

Алгоритм системного проектирования вентиляции горных предприятий (шахт, рудников, объектов подземного строительства), представленный на рисунке 5.6, включает шесть одновременно запускаемых процессов:

- 1) маркшейдерско-геологический контроль;
- 2) технологическое оперативное проектирование;
- 3) экономическое планирование;
- 4) мониторинг атмосферных параметров (климатических условий месторасположения горного предприятия);
- 5) «социальный» контроль;
- 6) системное проектирование вентиляции.

Основное действие (системное проектирование вентиляции) состоит из ряда шагов. На первом шаге происходит сбор исходных данных, которые поступают в ручном и/или автоматическом режиме в зависимости от имеющихся возможностей горного предприятия.

При маркшейдерско-геологическом контроле от соответствующих служб данные по свойствам пластов и вмещающих пород вносятся в

информационную базу для дальнейшего проектирования и проведения научных исследований. При любом изменении значений исходных данных происходит передача данных всем службам, занимающимся проектированием проветривания.

При строительстве и эксплуатации горного объекта маркшейдерская служба ведёт контроль топологии (соответствие проектным параметрам) и состояния горных выработок. Старение выработок (и, как следствие, изменение площади сечения выработок, формы, шероховатости), геомеханические изменения (пучение, обрушение) фиксируются маркшейдерскими службами и передаются в ручном или автоматическом режиме (при применении общей CAD-системы проектов) всем службам, занимающимся проектированием проветривания.

В процессе ведения горных работ при любом изменении в технологии, или применяемом оборудовании, или в количестве и типе взрывчатых веществ, применяемой закладке и т.п. отделами, занимающимися технологическим оперативным проектированием, об этом сообщается всем службам, занимающихся проектированием проветривания.

Службой аэрологической безопасности на стадии строительства и эксплуатации горного предприятия осуществляется контроль (мониторинг) параметров атмосферы. При необходимости ими вносятся коррективы в исходные данные по проектированию проветривания.

Под «социальным» контролем подразумевается три направления деятельности на горных предприятиях, связанные 1) с соблюдением норм и правил в части сохранения жизни и здоровья горнорабочих, 2) с выполнением природоохранных мероприятий и 3) с обучением и подбором квалифицированных инженерно-технических работников. Проведение расчётов при системном проектировании вентиляции шахт продолжается до тех пор, пока не будут выполнены требования безопасности [102]. Значения по допустимой концентрации газов и пыли, допустимому диапазону температуры и скорости движения воздуха являются основными показателями, достижение

которых ставится целью проведения расчётов по проветриванию. Санитарные нормы и правила в части соблюдения требований по допустимой влажности рудничного воздуха и перепаду давления, по радиоактивной дозе являются дополнительными показателями, достижение которых также обязательно для проведения расчётов по проветриванию. Вопросы экологической безопасности также являются важными. Их решение не должно быть второстепенным или решаться путём оплаты штрафов за выбросы, например, парниковых газов. Закладывая в исходные данные ограничения на концентрацию парниковых газов (например, метана и углекислого газа) в исходящих струях из шахт только при системном проектировании вентиляции, можно получить соответствующее решение.

Совместное проектирование систем вентиляции, дегазации и газоотсоса позволит существенно повысить эффективность этих способов управления газовыделением.

Подготовка высококвалифицированных кадров является важнейшим аспектом в реализации системного проектирования вентиляции. Требования к горному инженеру-проектировщику с применением системного проектирования вентиляции возрастают. Помимо основ горного дела, проектировщик должен обладать углубленными знаниями в области фундаментальных наук (физики, высшей математики) и в области работы со специализированными компьютерными программами. При этом проектирование переходит из проектных институтов на горное предприятие. Это позволит выполнять проектные работы в процессе эксплуатации шахты или рудника, оперативно внедрять и на законодательном уровне обосновывать новые решения по технологии и безопасности. Эти принципы реализованы в новой учебной программе по дисциплине «Аэрология горных предприятий», что позволит обеспечить подготовку горных инженеров с требуемым уровнем знаний, навыков и компетенций.

Седьмое действие запускается на шаге, когда выбраны основные параметры проветривания, и – позволяет провести оценку имеющегося резерва

по вентиляции, а также проработать (нештатные) аварийные режимы проветривания.

Выводы

Разработанные Методологические основы включают порядок выбора исходных данных, порядок системного проектирования, единую модель – виртуальный подземный аэрогазодинамический аналог, универсальный алгоритм.

Предложена классификация исходных данных для проектирования вентиляции, которая позволяет систематизировать получение статистических данных по горно-геологическим и технологическим условиям ведения горных работ во взаимосвязи основных параметров, влияющих на проветривание. Это позволит создать базу исходных данных для проектирования вновь создающихся и эксплуатируемых горных предприятий.

В основе получения исходных данных при системном проектировании проветривания лежат CAD-системы (системы автоматизированного проектирования), позволяющие оперативно (в режиме on-line) работникам разных служб (вентиляционной, маркшейдерской, геологической и т.д.) фиксировать и использовать в дальнейшем изменения по всем базовым и дополнительным исходным данным, что существенно ускоряет проведение корректирующих расчётов и повышает безопасность, обеспечивая соответствие текущих проектных решений фактическому состоянию горных работ.

Предложенный алгоритм по времени представлен двумя стадиями: 1-я стадия распространяется на период проектирования горного предприятия, 2-я стадия – на время строительства и эксплуатации горного предприятия. Алгоритм универсальный, на 2-й стадии добавляется управление и контроль проектных решений по вентиляции, что существенно повышает уровень аэрологической безопасности.

Разработанный алгоритм системного проектирования вентиляции на 2-й стадии строительства и эксплуатации является единым для всех горных предприятий. Он определяет порядок сбора, обработки и корректировки проекта. Системный подход, заложенный в алгоритме системного проектирования вентиляции горных предприятий позволяет учесть одновременно в расчётах все источники тяги (работу вентиляторов, газоотсасывающих устройств и дегазации). Отличительной особенностью системного проектирования вентиляции является то, что обновление исходных данных и перерасчёты идут постоянно, по всем видам деятельности горного предприятия: по технологии ведения горных работ, при экономических расчётах, при маркшейдерско-геологических изысканиях, при административной работе, по обоснованию и уточнению норм и требований, по решению социальных задач (обучение, улучшение условий труда и т.п.), по климатическому контролю.

Разработанная и внедрённая методология системного проектирования вентиляции шахт и рудников решает одну из проблем современной науки в области обеспечения безопасности и эффективности горных работ путём применения новейших методов исследования.

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ

Верификация производилась в процессе выполнения Государственных заданий и хоздоговорных научных работах (приложение 5).

6.1. Методика исследований

По разработанной методологии проведено системное проектирование вентиляции тупиковых горных выработок и отдельных элементов шахтной вентиляционной сети (выемочных участков и камер).

Методика представлена в виде последовательно выполняемых этапов.

1 этап. Проведение сбора и анализа исходных данных по горно-геологическим условиям; по проектным решениям принятой технологии и оборудованию; проведение натурных измерений параметров проветривания (скорости движения воздуха, депрессии, давления, температуры, влажности, газовыделения, естественной тяги, тепловыделения) для определения внешних факторов.

2 этап. Проведение предварительных расчётов параметров проветривания, включающих прогноз поступления вредностей в рудничную атмосферу, составление аэродинамической схемы, расчёт воздухораспределения и т.д.

3 этап. Проведение контрольных измерений габаритов горного и вентиляционного оборудования, а также параметров его размещения и параметров горных выработок.

4 этап. Создание виртуального аналога подземной аэрогазодинамической системы, включающий следующие действия: по проектной документации (планы ведения горных работ, паспорта ведения проходческих и добычных работ, паспорта горного оборудования и др.) в графических компьютерных программах в масштабе 1:1 создаётся трёхмерная модель проектируемого или

обследуемого объекта; выбираются система уравнений, модели турбулентности, задаются краевые условия на основании параметров, полученных при натурных измерениях и результатов анализа.

5 этап. Верификация модели включает проведение численных расчётов, при необходимости – корректировку параметров моделей, краевых условий, изменение расчётной сетки, оценку сходимости расчётов и сравнение результатов расчетов с фактическим состоянием.

6 этап. Проведение моделирования в диапазоне определяющих параметров, получаемых при предварительном анализе, с учётом возможных нештатных ситуаций для проектируемого или обследуемого объекта. Анализ полученных результатов позволяет выбрать оптимальные режимы проветривания, при которых значения скорости движения воздуха, температуры и концентрации контролируемых газов, соответствуют допустимым.

7 этап. Принятие новых технических решений при невозможности выполнения требований безопасности. Выявляются причины, затрудняющие проветривание, в расчётах изменяются технологические параметры (технологические схемы, размеры горных выработок, скорости подвигания и т.п.) и расчёт производится повторно до получения желаемого результата. Таким образом, прорабатываются варианты по улучшению проветривания и наилучшие с экономической и технологической точки зрения принимаются к исполнению.

Все расчёты и натурные измерения производятся в соответствии с действующими нормативными документами [163, 202, 207, 182, 259, 212, 248, 48, 52, 41].

6.2. Реализация системного проектирования вентиляции шахт

Системное проектирование вентиляции шахт сложный, трудозатратный процесс, требующий большого количества исходных данных. При этом для

получения удовлетворительного результата проектирования расчёт воздухораспределения, переноса вредных газов и теплового режима целесообразно проводить последовательно как отдельные задачи.

Преимуществом системного проектирования вентиляции от общепринятого для угольных шахт в настоящее время отличием является возможность учёта совместной работы главных вентиляторных установок, дегазации и газоотсасывающих установок. Также может производиться учёт величины естественной тяги, температуры вмещающих пород и других факторов.

Для анализа возможности решения задачи проектирования сложных систем проветривания была создана трёхмерная модель угольной шахты с различными источниками тяги (рисунок 6.1).

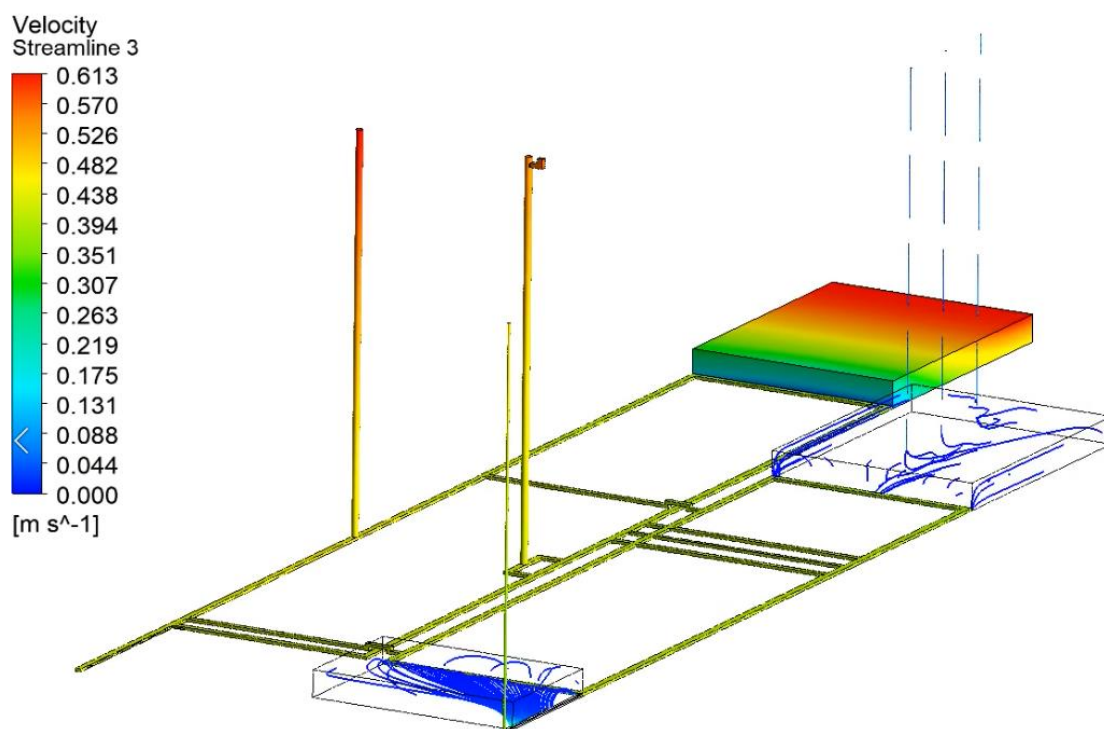


Рисунок 6.1 – Результаты численного расчёта распределения давления по поверхности горных выработок и изолинии скорости движения воздуха по шахте с учётом работы ГВУ, дегазации и ГОУ

В задаче проводилось численное определение параметров проветривания (распределения скоростей движения воздуха и давления) в горных и газодренажных выработках и в выработанном пространстве [317, 346]. По линиям тока в выработанном пространстве можно определить фильтрационные

скорости и зоны, в которых может образоваться скопление газа. Определяющие характеристики вентиляторов (главного и местного проветривания, а также газоотсасывающих установок) могут быть заданы равномерно распределёнными по сечению входной границы величинами: скоростью движения воздуха, статического напора с определённой неизменяющейся температурой. При сложном многовариантном проектировании параметры вентиляторных установок могут быть заданы из результатов их отдельного численного моделирования.

Преимущество создания виртуальных аналогов перед существующими программами по расчёту воздухораспределения подтверждается проведённой верификацией при разработке мероприятий по улучшению проветривания сланцевой шахты «Эстония». На предприятии применяется камерно-столбовая система разработки, способ добычи сланца буровзрывной, что при интенсификации добычи требует увеличения количества воздуха для добычного участка. По параметрам системы разработки была разработана трёхмерная модель – виртуальный аналог элемента системы вентиляции (рисунок 6.2). Начальные условия были приняты по данным натурных измерений. Измерения проводились анемометром АПР-2, микроманометром ММН-2400, термометром-психрометром ТГО-2МП по существующим методикам [207, 208]. Была проведена серия измерений (более ста мест) точечным способом (в сечении не менее 30 точек по 2-3 измерения в каждой из них). Расхождение натурных измерений с результатами численного моделирования составило 5%.

Особенностью воздухораспределения при данной системе разработки является сложный вид течения воздуха в выработанном пространстве, поддерживаемом целиками размером 6×6 метров. Анализ проведённых расчетов показал, что движение воздуха в шейках и в коротких забоях происходит лишь за счёт молекулярной диффузии. При этом в центре отработываемого блока проветривание существенно ухудшается, что было зафиксировано натурными измерениями.

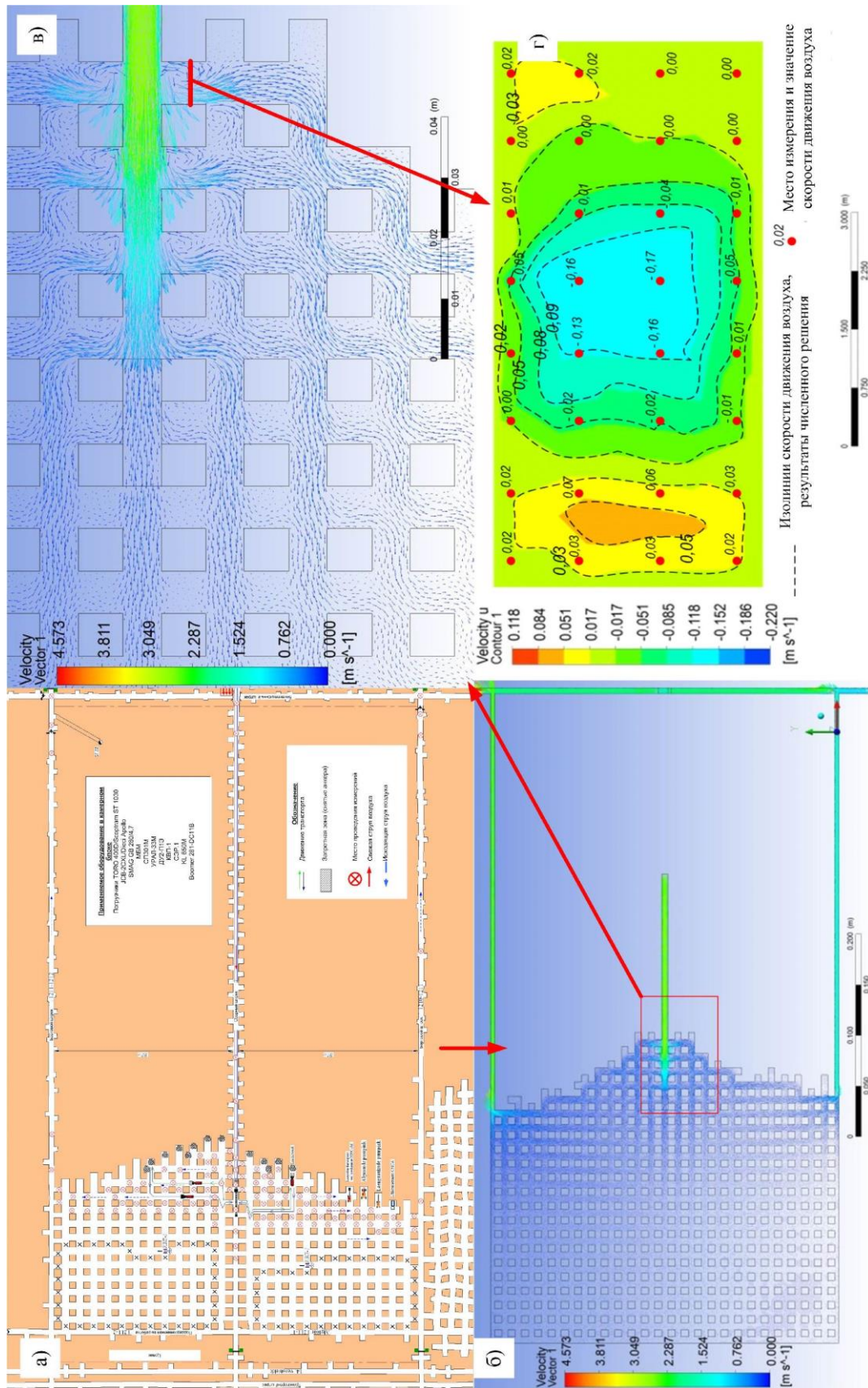


Рисунок 6.2 – Этапы верификации численного моделирования с натурными измерениями параметров проветривания камерного блока шахты «Эстония», панель 1210: а) выкопировка с плана ведения горных работ; б) результаты расчёта в виде векторов скорости движения воздуха; в) укрупнённый фрагмент результатов расчёта; г) сравнение результатов расчёта с натурными измерениями скорости движения воздуха

Второй особенностью, зафиксированной при верификации и рассчитанной при моделировании, является сложное течение в межделиковом сечении, где происходит рециркуляция воздушных потоков. Аналогичные исследования проводились в трёх камерных блоках сланцевой шахты «Эстония». По результатам системного проектирования (проектирование участковой вентиляции), полученным при численном моделировании, для улучшения проветривания были предложены мероприятия по перераспределению поступающего воздуха к забоям за счёт установки дополнительных мобильных вентиляционных сооружений, используемые при проектировании новых камерных блоков.

Проектирование процессов проветривания производилось для условий шахты «Гипс-Кнауф», применяющей камерно-столбовую систему разработки. Принятая система разработки усложняет схему проветривания панелей. Были проведены расчёты существующего режима проветривания, результаты приведены на рисунке 6.3. По векторам скорости в 50-метровых добычных камерах отчётливо видно отсутствие движения воздуха. Моделирование показало, что применение пульсирующей вентиляции для увеличения дальности проветривания этих камер будет эффективно.

Моделирование аэрогазодинамических процессов для тупиковых выработок и выемочных участков с длинными очистными забоями проводилось для условий шахты им. С.М. Кирова. На рисунке 6.4 отображены результаты расчётов для проходческого забоя. Характерной особенностью структуры течения метановоздушной смеси в тупиковых проходческих забоях является наличие зон с пониженными скоростями и застойными зонами, со скоростями менее 0,01 м/с, в местах за комбайном и на определенных расстояниях от плоскости забоя в зависимости от скорости движения поступающей свежей струи, расстояния отставания вентиляционной трубы от забоя. Проведённые расчёты по предлагаемому методу для условий угольной шахты им. С.М. Кирова показали возможность наличия скоплений метана при интенсивном его

выделении в застойных зонах, а также за вентиляционным трубопроводом, что подтверждается натурными исследованиями.

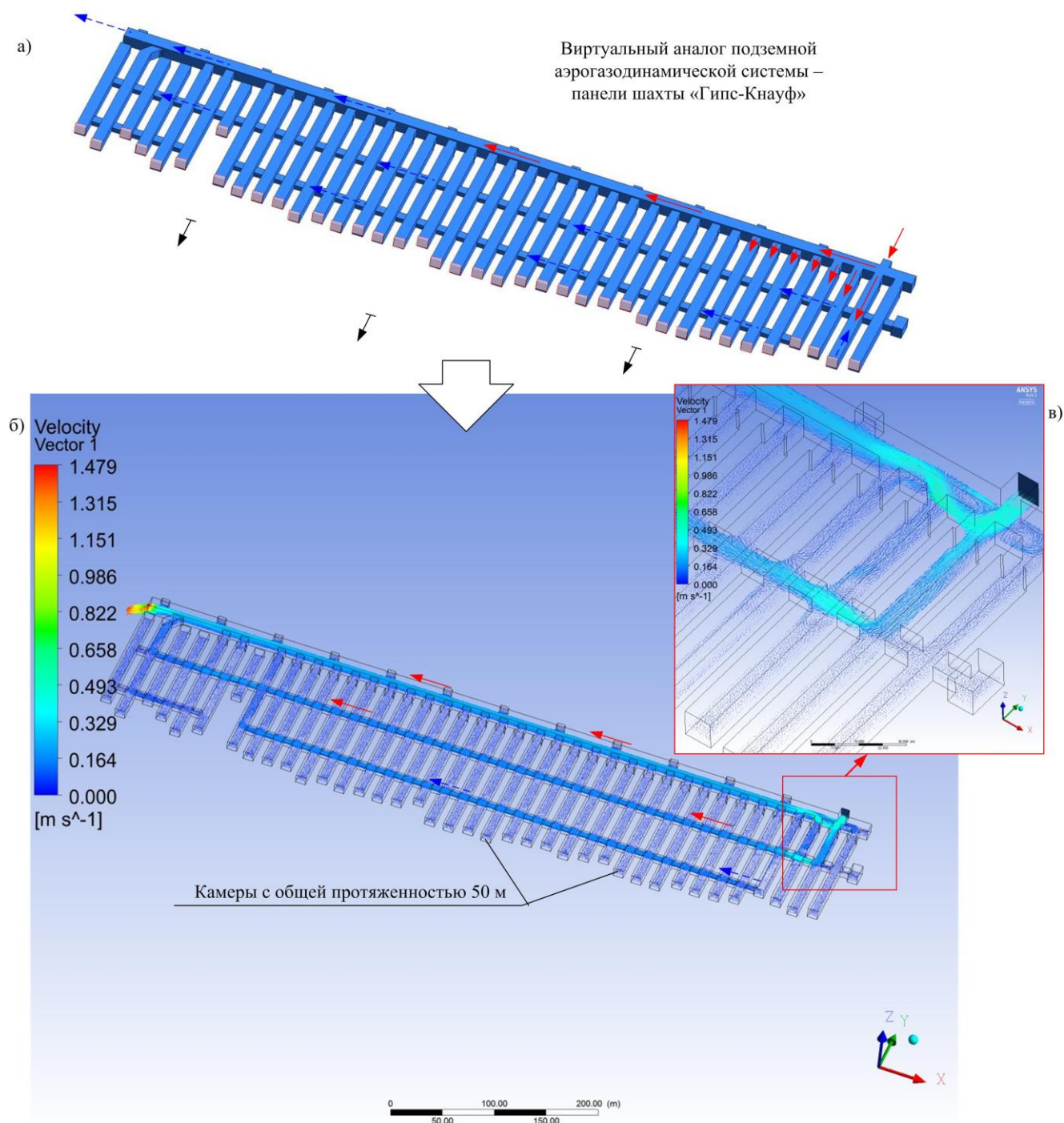


Рисунок 6.3 – Виртуальный аналог и результаты численного расчёта процесса проветривания панели шахты «Гипс-Кнауф»: а) виртуальный аналог камерного блока; б) результаты расчёта в виде векторов скорости движения воздуха; в) укрупнённый фрагмент результатов расчёта

Результаты моделирования аэрогазодинамических процессов выемочного участка, включая выработанное пространство, приведены на рисунке 6.5, (для условий лавы 24-54 шахты им. С.М. Кирова). Сравнение полученного решения с данными натурных экспериментов показало достаточно высокую сходимость (более 90 %).

Для условий пласта Болдыревский были приняты [94] коэффициенты проницаемости и потерь для выработанного пространства ($K_{\text{perm}} = 0,4 \cdot 10^{-5}$, $K_{\text{loss}} = 0,2 \cdot 10^{-5}$). При моделировании учитывалось влияние геометрии секций крепи на скорость движения воздуха. Было установлено, что при низких скоростях движения воздуха метан вдоль кровли мигрирует в выработанное пространство. При наличии зазоров между секциями крепи, могут иметь место как утечки, так и подсосы метановоздушной смеси в призабойное пространство.

Моделирование позволяет рассчитывать величину утечек метановоздушной смеси в выработанное пространство в зависимости от технологических и горно-геологических параметров, таких как скорость движения воздуха, применяемый тип крепи, абсолютное газовыделение. Шахтные эксперименты позволяют сделать вывод о высокой достоверности полученных результатов (погрешность составила 2%).

Результаты численного моделирования показали, что разработанная модель позволяет выполнять прогноз и анализ газодинамических ситуаций в горных выработках и в выработанном пространстве для выбора рациональных технических решений по управлению газовыделением как при оперативном планировании развития горных работ, так и при разработке проектов вновь строящихся шахт.

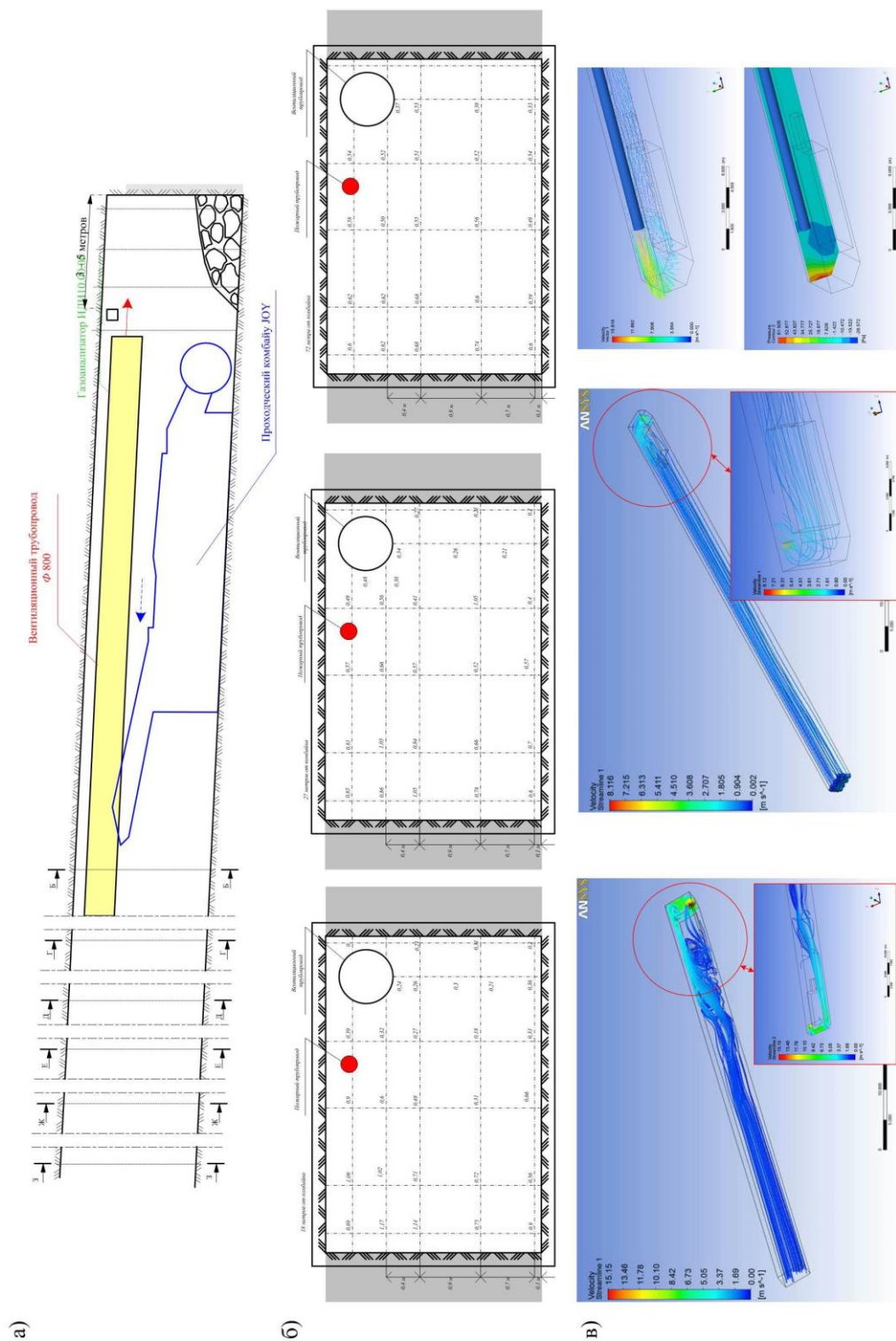


Рисунок 6.4 – Верификация результатов численного расчёта проветривания: а) расчётная схема действующего проходческого участка; б) результаты натурных измерений; в) результаты численного расчёта применяемого (нагнетательного) и альтернативного (всасывающего) способа проветривания

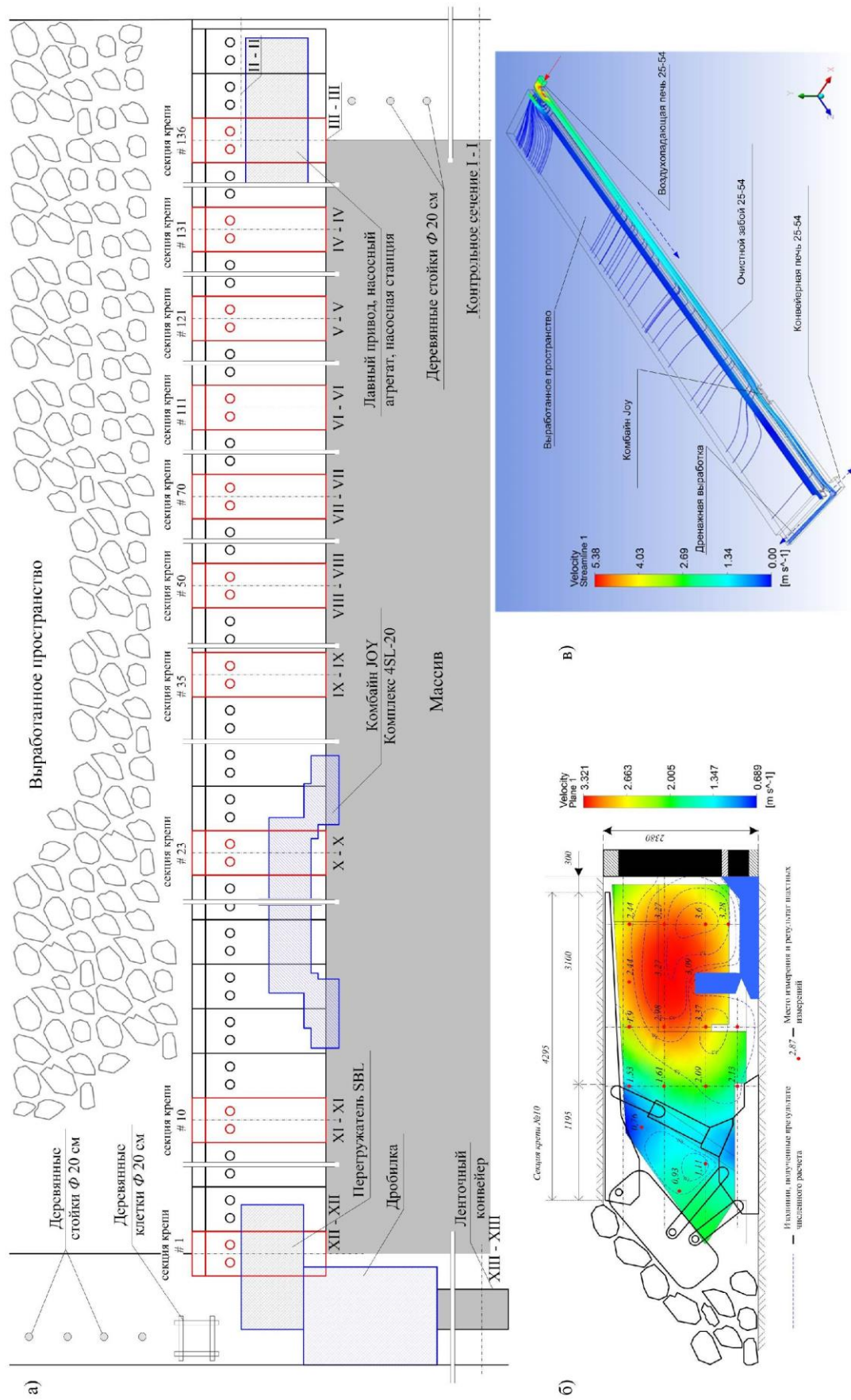


Рисунок 6.5 – Сравнение результатов численного моделирования и натуральных измерений шахты им. С.М. Кирова, лава 25-54:
а) расчётная схема действующего выемочного участка; б) результаты верификации натуральных измерений с расчётными данными (по поперечному сечению очистного забоя); в) линии тока утечек воздуха в выработанном пространстве

В рамках системного проектирования проводились исследования способов проветривания тупиковых горных выработок при их проходке. Для условий шахты пологого падения угольного пласта средней мощности установлено, что при нагнетательном способе проветривания воздух выходит из трубопровода в виде свободной струи с наиболее высокой скоростью движения и распространяется в основном вдоль борта выработки, в дальнейшем равномерно распределяется по всей горной выработке. При любой допустимой скорости воздуха в призабойном пространстве в зоне действия исполнительного органа комбайна имеют место застойные зоны, что объясняется недостаточной степенью турбулизации воздушных масс в призабойной части. При нагнетательном способе проветривания и высокой скорости проходки в таких зонах могут формироваться местные скопления.

При всасывающем способе проветривания скорость воздушной струи по мере приближения к всасывающему отверстию трубопровода увеличивается и у самого входного отверстия достигает максимального значения. Поэтому значительная часть потока воздуха не участвует в проветривании непосредственно призабойной части, а поступает сразу во всасывающий трубопровод. Это является одной из причин того, что всасывающий способ проветривания практически не применяется на газообильных угольных шахтах России. Преимущество всасывающего способа по сравнению с нагнетательным является то, что по всему сечению выработки проветривание осуществляется равномерно свежей струей. Результаты проведённых исследований подтверждают целесообразность применения всасывающего способа проветривания тупиковых выработок при минимальном расстоянии отставания (0,5-1,5 м) конца воздуховода от забоя. При невозможности обеспечить такое отставание воздуховода от забоя предпочтителен нагнетательный способ проветривания.

6.3. Реализация системного проектирования вентиляции при строительстве горных предприятий

Для апробации разработанной в данной работе методологии исследования проводились на объектах подземного строительства двух стволов шахты «Глубокая» рудника «Скалистый» – Вентиляционный ствол №10 (ВС-10) и Скиповой ствол №1 (СКС-1).

Исследования проводятся в период 2014 – 2017 гг. Основой системного проектирования стали разработанный ранее проект проветривания, технологические решения, принимаемые при строительстве стволов, горно-геологические и климатические условия.

При создании трёхмерной геометрической модели были использованы технологические чертежи. Общий вид ствола представлен на рисунке 6.6. Для получения необходимой точности результатов тубинговая часть ствола и часть ствола с бетонными кольцами были смоделированы с высокой степенью детализации крепи. Полученная геометрическая модель дала возможность максимально приблизить результаты моделирования к реальным условиям.

При ознакомлении с технологией проходки ствола было аналитически определено, что полук (7 этажей) увеличивает сопротивление ствола, далее это было подтверждено натурными измерениями. Поэтому было принято решение учесть полук при создании трёхмерной модели.

Для получения достоверных результатов при моделировании процессов массопереноса размеры конечных объёмов должны быть соотнесены с минимальными размерами деталей геометрической модели. Минимальный размер элемента был задан 0,01 м, максимальный – 1 м.

Результаты численного расчёта представляются в виде графиков распределения отдельных величин по характерным точкам и рисунков (распределение изолиний, распределение по секущим плоскостям и т.д.). Пример результатов расчётов приведён на рисунке 6.7.

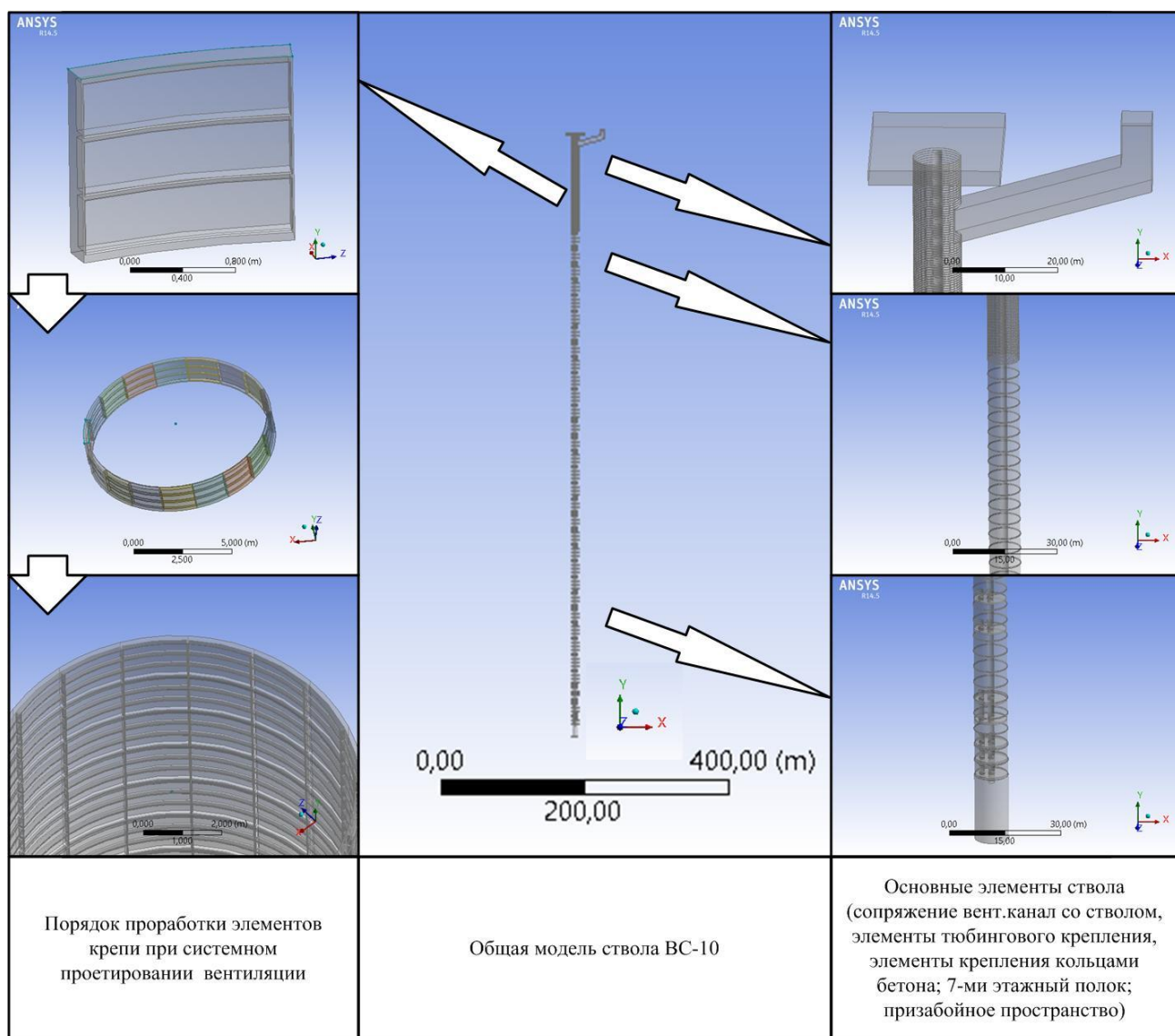


Рисунок 6.6 – Общий вид ствола

На основании выполненных расчётов данных установлена зависимость изменения давления в стволе. В призабойной зоне наблюдается наибольшее давление. За полками давление резко снижается, далее по стволу давление снижается плавно. По графику 6.7 можно сделать вывод, что процесс изменения давления имеет нелинейную функцию.

После проработки на уровне «Общешахтного проектирования проветривания» переход был сделан на уровень «Участкового проектирования проветривания». На данном этапе решались задачи интенсификации процесса проветривания призабойной части, а также примыкающих к стволу выработок околоствольных дворов и камер.

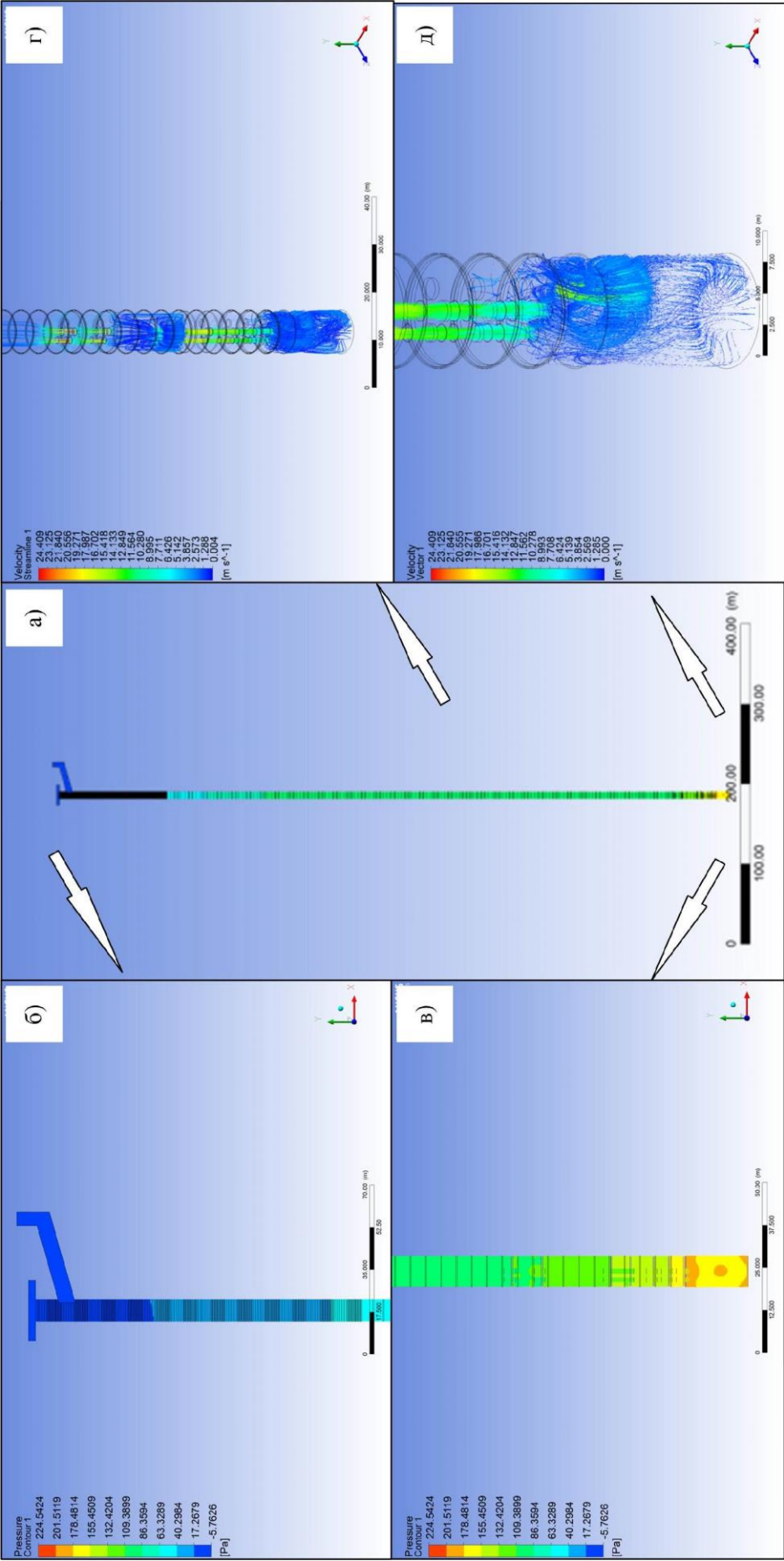


Рисунок 6.7 – Результаты численного моделирования параметров проветривания на первом этапе системного проектирования: а) распределение давления по продольному сечению ствола; б) и в) укрупнённые фрагменты результатов расчёта давления в устье ствола и в призабойной части, соответственно; г) и д) распределение векторов скорости движения воздуха вдоль проходческого полка в призабойной части, соответственно

При проведении ежесменных измерений состава рудничной атмосферы было выявлено, что процесс выноса вредных и опасных газов в центральной части призабойного пространства затруднён. Для улучшения проветривания призабойной части были проведены расчёты с применением различных вариантов выпуска поступающей струи воздуха. Рассматривалось несколько вариантов проветривания с использованием различных насадок на вентиляционном трубопроводе, изменяющих направление потока, применение сжатого воздуха по принципу эжекторов, применение Air Mover и разделительных перегородок (рисунок 6.8).

При численных расчётах были рассмотрены все варианты с различными режимами проветривания. Трёхмерная модель состояла из части ствола, призабойной области и пяти нижних этажей полка. Результаты численного расчёта представлены на рисунке 6.9.

Как видно из расчёта, первый вариант проветривания в призабойной части ствола отображает фактическое воздухораспределение без дополнительных мероприятий. Здесь имеется застойная зона, в этой зоне происходит скопление газа. Основной воздушный поток делает «петлю» и уходит вверх по стволу через отверстия, предназначенные для прохода бады. Часть воздуха идёт между этажом полка и стеной ствола.

Второй вариант расчёта отражает интенсификацию проветривания в призабойной части, однако, данные изменения привели к отрицательному результату: поток тормозится на первом повороте и усложняет проветривание призабойной части ствола.

Третий вариант проветривания не дал заметных изменений относительно первого.

Четвёртый вариант проветривания с выпуском свежей струи воздуха в сторону борта выглядит предпочтительнее, при этом призабойная зона разделяется на две части, внутри каждой наблюдается застойная зона, где могут скапливаться газы.

Пятый вариант рассматривался с применением сжатого воздуха, выпускаемого через трубку, установленную в металлическом воздуховоде, с целью увеличения скорости движения воздуха и дальнобойности воздушной струи. При этом существенную роль играет давление, при котором выпускается сжатый воздух. Оптимальное решение получается при давлении 600 кПа.

6-й и 7-й варианты проветривания рассматривались с применением Air Mover (направленного соответственно вверх и вниз), обеспечивающего ускорение воздушного потока в призабойной части. Результаты, полученные путём моделирования, показали малую эффективность применения Air Mover.

Вторая решённая задача на этапе «Участковое проектирование проветривания» решалась с целью выбора оптимальных решений по вентиляции примыкающих горных выработок к стволам. Проектирование вентиляции осуществлялось для двух этапов: стадии строительства и эксплуатации (до завершения строительства и сбойки стволов).

На стадии строительства обводных выработок проветривание осуществлялось нагнетательным способом по схеме, приведённой на рисунке 6.10, а также для данного варианта был проведён расчёт, который позволил выбрать оптимальные режимы проветривания для разных выработок и камер.

После завершения строительства обводных горных выработок, вентиляционно-закладочного и откаточного горизонтов, камер с длиной более 10 метров при использовании данных выработок для технологических операций (организация камер служебного назначения) необходимо обеспечить их проветривание обособленной струёй свежего воздуха с выбросом отработанного воздуха непосредственно на исходящую струю участка (шахты) в соответствии с Федеральными нормами и правилами [9]. Рассматривались два варианта проветривания: 1) при помощи разделения обводных выработок гипсовой легкой перемычкой (шлюзом) с вмонтированным в неё вентилятором местного проветривания ВМЭ-6 (рисунок 6.10) и 2) изоляцией выработок глухой перемычкой.

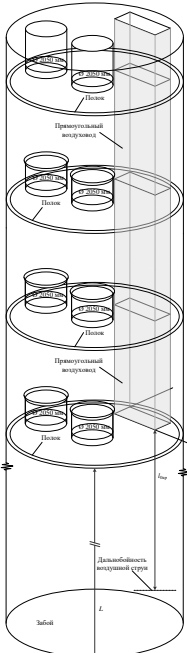
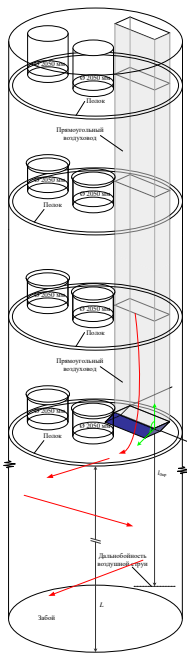
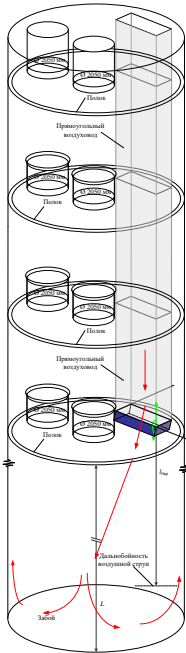
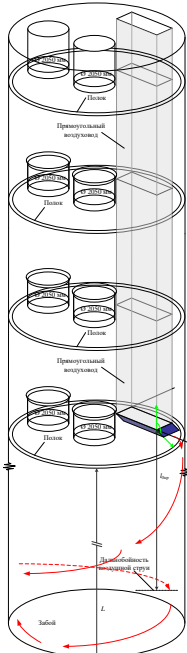
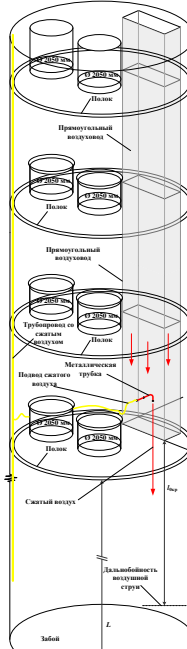
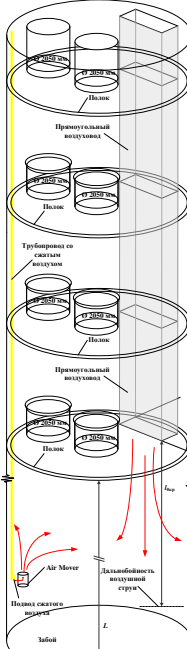
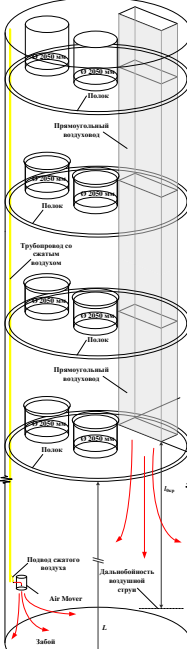
1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант	4-й вариант
			
Без применения технических решений	С поворотом вент. трубопровода к центру ствола	С незначительным поворотом вент. трубопровода к центру ствола	С поворотом вент. трубопровода к стенке ствола
5-й вариант	6-й вариант	7-й вариант	
			
С применением металлической трубки со сжатым воздухом (по типу эжектора)	С применением Air Mover (направленного вверх)	С применением Air Mover (направленного вниз)	

Рисунок 6.8 – Варианты улучшения проветривания призабойной части

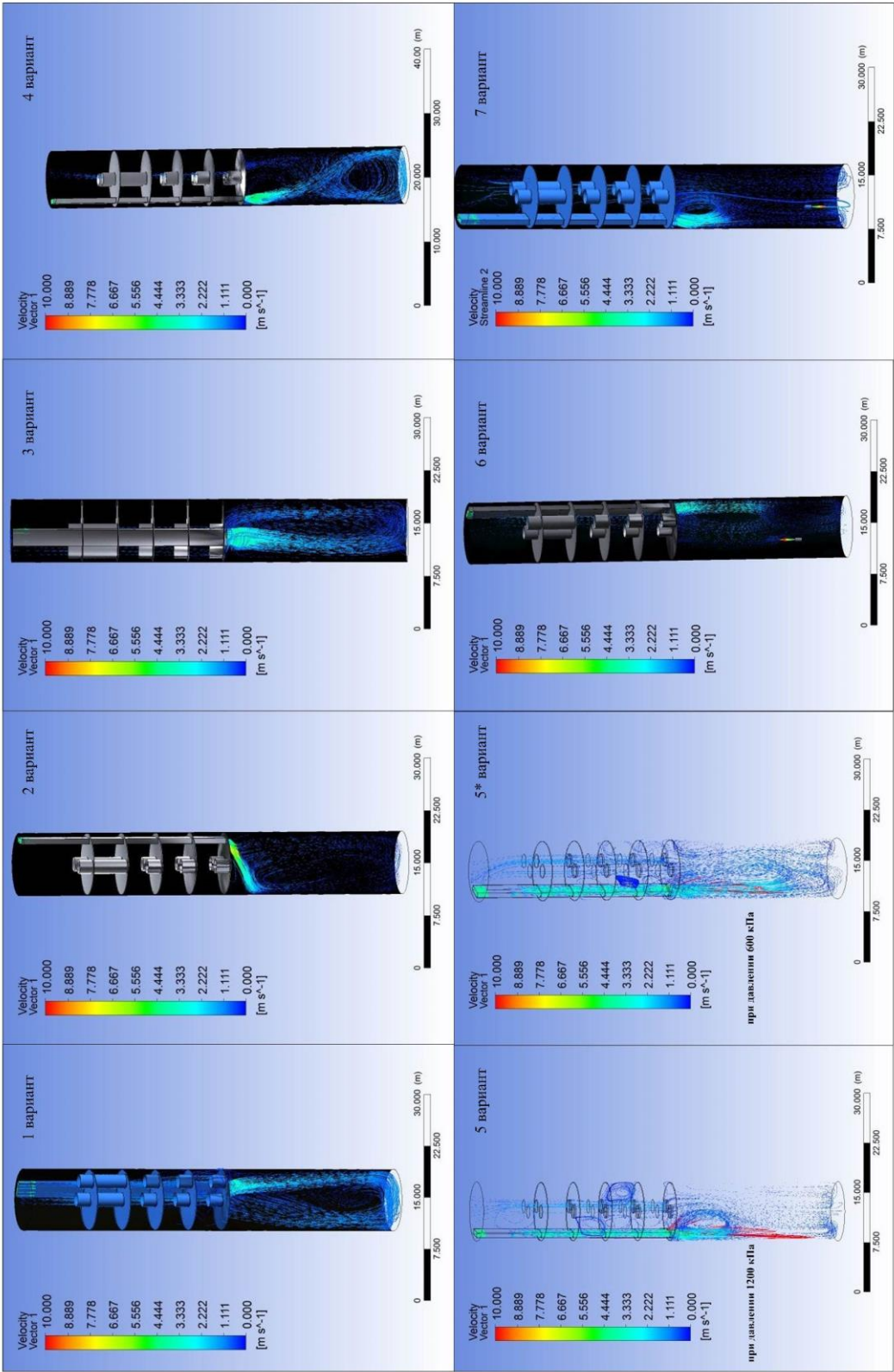


Рисунок 6.9 – Результаты численного расчёта по различным вариантам интенсификации проветривания в призабойной части ствола (в соответствии с вариантами, представленными на рисунке 6.10)

Цель проведения моделирования вариантов проветривания – оценить их пригодность для обеспечения требований ФНП по минимально допустимой скорости движения воздуха. Результаты численного моделирования представлены на рисунке 6.11.

На третьем этапе «Проектирование вентиляции отдельных элементов ШВС» решались локальные задачи прогноза естественной тяги, скопления вредных и опасных газов после проведения взрывных работ в камерах и выработках, примыкающих к стволу, а также изучалось влияние различных режимов проветривания на температуру воздуха в стволе.

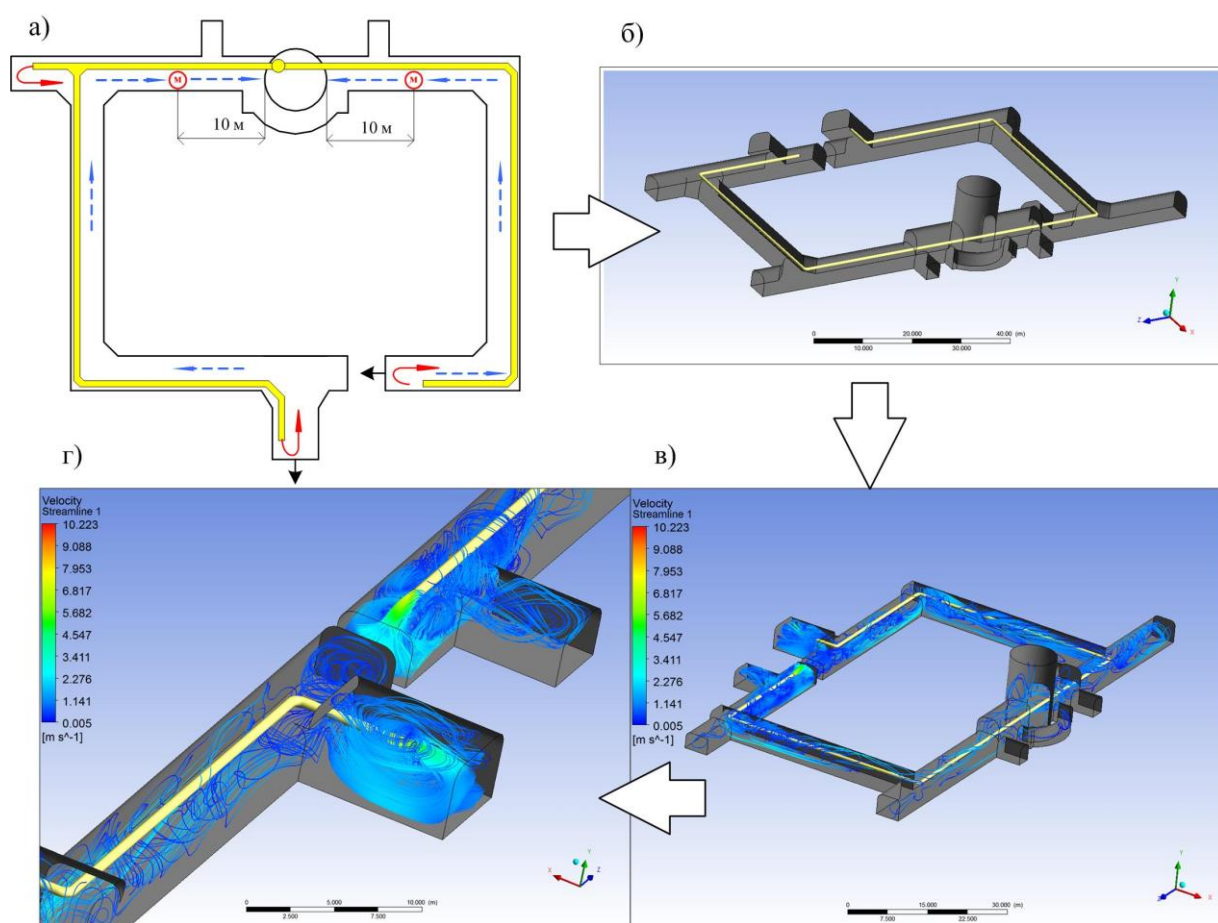


Рисунок 6.10 – Результаты численного расчёта проветривания примыкающих камер вентиляционного горизонта: а) схема к расчёту; б) трёхмерная модель; в) изолинии тока движения воздуха в выработках околоствольного двора; г) укрупнённый фрагмент расчётов

В призабойной части строящегося ствола ВС-10 требуется подобрать такой режим проветривания, чтобы температура рудничной атмосферы была в

пределах от 2°C до 26°C [9]. Уникальность горно-геологических условий и климатической зоны, в которой ведутся работы, отражается на выборе технологий и существенно влияет на процесс проветривания. Работы ведутся в условиях Крайнего Севера и низких температур.

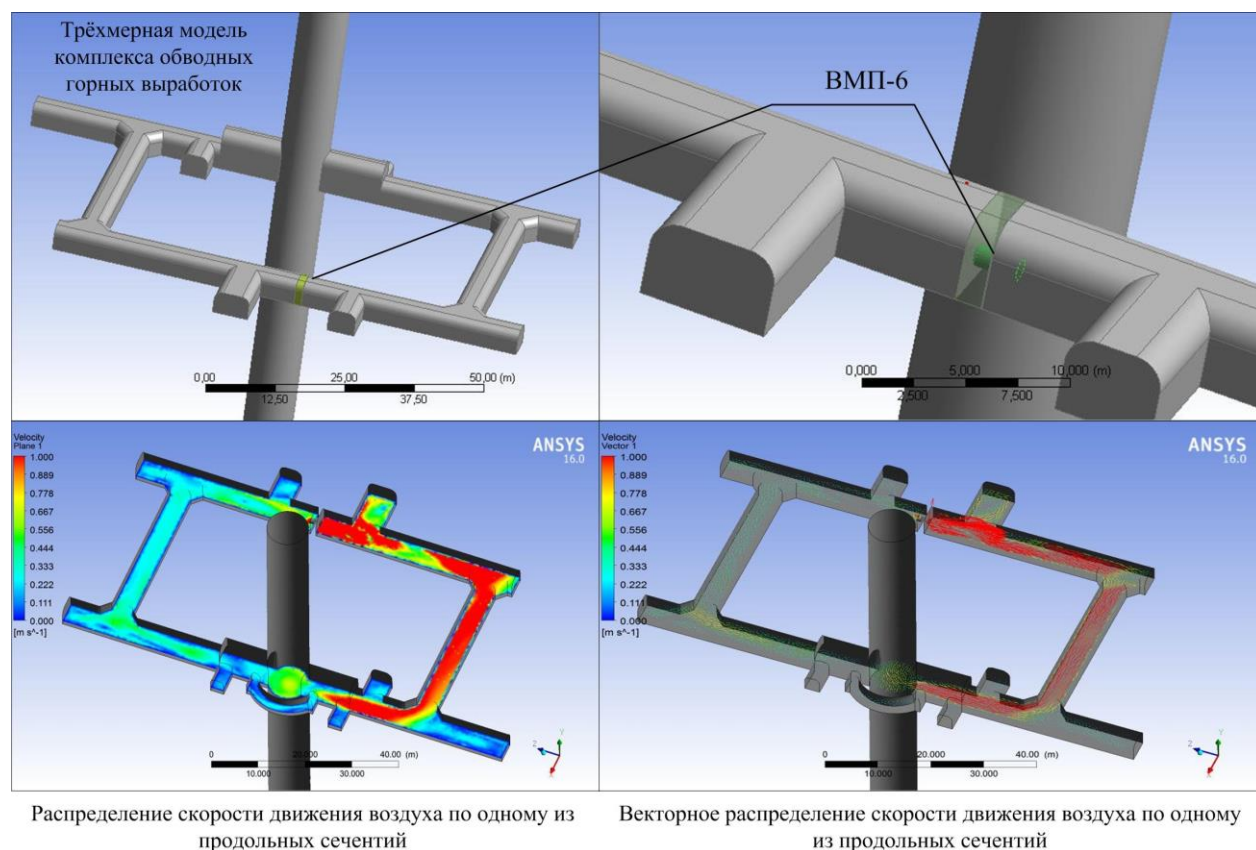


Рисунок 6.11 – Трёхмерная модель выработок вентиляционно-закладочного горизонта и результаты численного моделирования

С ростом глубины ведения горных работ увеличивается температура пород (по расчётам на глубине 2050 метров температура пород составит около 48°C). Часть ствола (127 метров или 5% от общей итоговой длины) находится в мёрзлых грунтах. Режим проветривания должен быть таким, чтобы не происходило оттаивание пород у ствола ближе к поверхности Земли, а также соблюдались ФНП в призабойной части ствола. Для чего было проведено численное моделирование теплового режима при разных расходах подаваемого воздуха. Общая схема модели и сводные результаты расчёта температуры рудничной атмосферы, массива пород и изолинии скорости движения воздуха

для одного из вариантов представлены на рисунке 6.12. Модель состояла из части массива горных пород (цилиндрической формы в диаметре 40 и 200 м), горной выработки – ствола ВС-10 (диаметр 9 м), воздуховода (диаметром 1,8 м). По воздуховоду подаётся воздух с разной скоростью (от 2,5 м/с до 25 м/с с шагом 0,5 м/с), температура поступающего воздуха в забой равна от 20 до 26 °С, на границе горного массива задаётся постоянная температура воздуха 40 °С, соответствующая фактическим данным, полученным путём прямого измерения. Модель с целью ускорения расчётов упрощена в части задания параметров горных пород (принято допущение об однородности вмещающих пород) и отсутствия местных сопротивлений (полка).

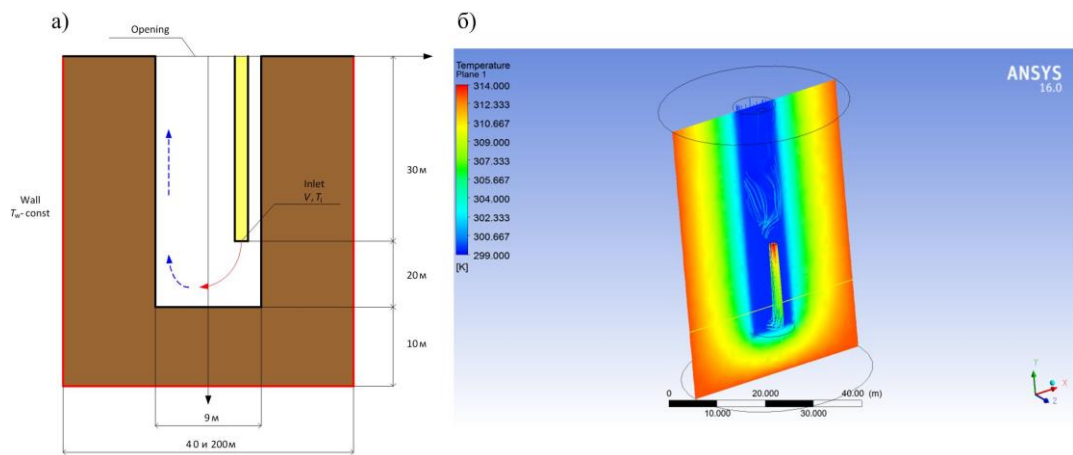


Рисунок 6.12 – Схема к расчёту (а) и результаты численного моделирования распределения температуры и скорости движения воздуха (б)

В результате проведённого моделирования были получены данные по распределению температуры в массиве горных пород и в призабойной части ствола рудничной атмосферы. По представленным графическим данным видно, что температура массива горных пород вглубь меняется незначительно. Изменение температуры воздуха в призабойной части существенно зависит от скорости (количества подаваемого воздуха). При больших скоростях воздух меньше нагревается от массива горных пород, а образующаяся «тепловая рубашка» становится толще.

Второй задачей проектирования элементов ШВС являлось определение возможности образования скоплений газов в примыкающих к стволу

выработках и камерах по ходу движения исходящей струи воздуха после взрывных работ. Результаты численного расчёта при условиях восходящего движения вентиляционной струи после проведения взрывных работ со средней скоростью 0,5 м/с с содержанием диоксида азота в количестве 0,003% по объёму (по факту) представлены на рисунке 6.13. Красным цветом выделено скопление газа по почве (в процентах по объёму), расчёт произведён для условий постоянного содержания газов в рудничной атмосфере. Газовоздушная смесь после взрывных работ, поднимаясь по стволу, в местах сопряжения с примыкающими горными выработками попадает в них. Тяжелые газы (оксиды азота, углекислый газ, сероводород и т.д.) скапливаются у почвы от сопряжения горных выработок на расстоянии более 10 метров (расстояние, на котором происходит проветривание за счёт диффузии), что представляет большую опасность.

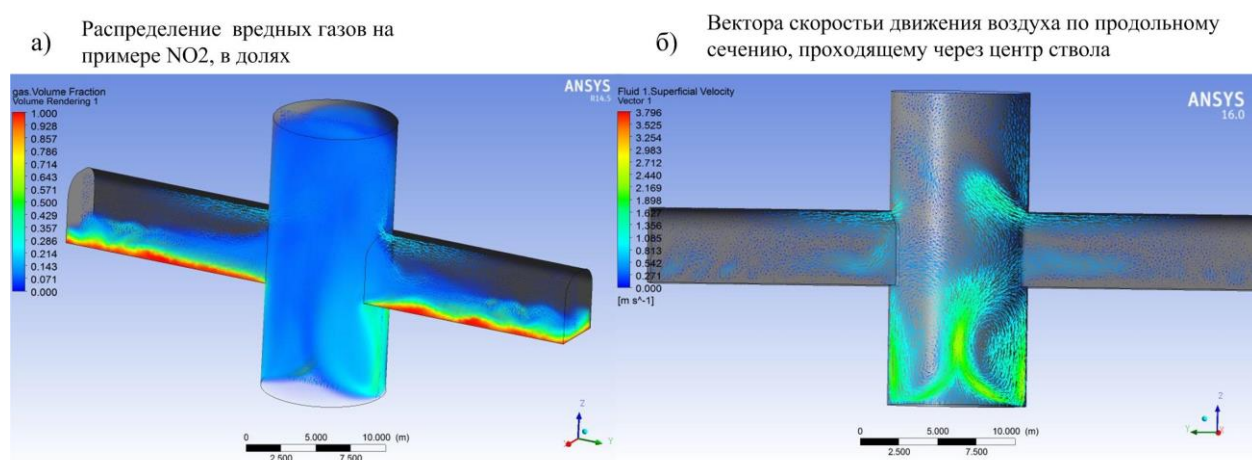


Рисунок 6.13 – Результаты численного расчёта попадания газов в примыкающие к стволам выработки (а) и вектора скорости (б)

Третья задача, решаемая в рамках третьего этапа системного проектирования вентиляции, посвящена вопросам влияния естественной тяги на вентиляцию строящихся стволов. В первую очередь при помощи разработанной методологии (подхода, алгоритма и модели) был осуществлён прогноз влияния естественной тяги на проветривание стволов, что

действующими методиками проектирования не предусмотрено. На основе сведений по диапазону температур атмосферного воздуха для различных стадий строительства горных объектов была, определена величина депрессии, обусловленная естественной тягой, распределение скоростей движения и температуры воздуха. Были определены условия туманообразования в стволах и примыкающих горных выработках, а также явления, связанные с разнонаправленным движением воздуха по одной горной выработке за счёт различных факторов (результаты расчёта приведены на рисунке 6.14). Явления разнонаправленного движения воздуха были инструментально зафиксированы как в вентиляционном канале, так и в самом стволе.

Для определения причин образования тумана в устье ствола СКС-1 и льдообразования в вентиляционном канале ствола СКС-1, были проведены расчёты с использованием численного моделирования и натурные измерения.

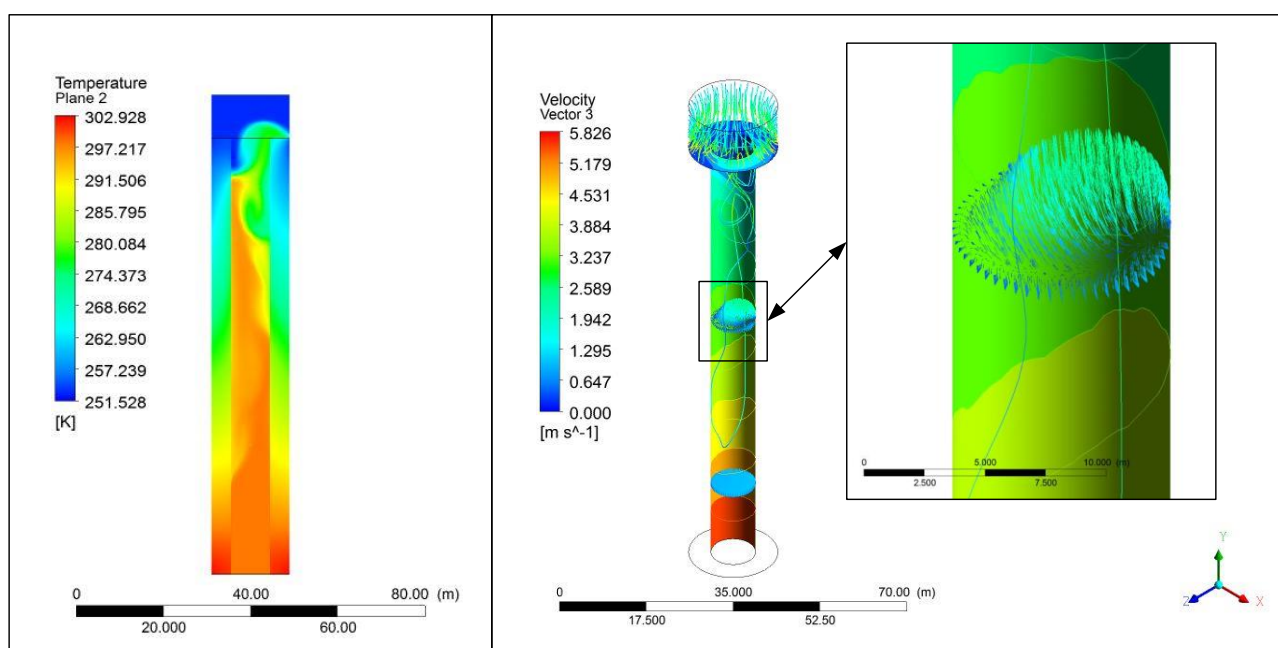


Рисунок 6.14 – Результаты численного расчёта распределения температуры воздуха в стволе и в массиве горных пород с учётом естественной тяги и вектора скорости движения воздуха в продольном сечении

На данном этапе системного проектирования рассматривалась система, включающая в себя область горных масс с изменяющейся температурой. У поверхности температура пород равна температуре воздуха (-20°C), с глубиной

температура линейно растёт (с учётом геотермического коэффициента). Геометрия модели была составлена в упрощенной форме без вентиляционного канала и покрывающего его контейнера. Над стволом выделена отдельная область атмосферы высотой 10 м с постоянной температурой -20°C . По стволу вверх поднимается тёплый воздух с температурой 25°C . Результаты расчётов показали, что происходит интенсивное распределение тепла по массиву, а также происходит активное охлаждение воздуха в стволе. При этом по результатам моделирования с учётом изменяющейся температуры массива горных пород появляются обратные течения воздуха против движения основного потока. Воздух охлаждается от стен ствола. При незначительном перепаде давления (более низком, чем величина естественной тяги) холодный воздух подсасывается с поверхности. Величина температуры поверхности вентиляционного канала, стен (борта) в устье ствола и контейнера существенно влияют на образование тумана и льдообразование. На основании проведённых расчётов и результатов натурных измерений были определены режимы проветривания стволов, при которых туманообразование происходит не в стволе, а в атмосфере или частично в вентиляционном канале. Смещение локализации процесса туманообразования позволяет исключить риск льдообразования в стволе и вентиляционном канале, что существенно повышает безопасность ведения горных работ.

Проведённый комплекс расчётов для объектов горного строительства на разных этапах и для разных элементов в комплексе с учётом технических, климатических, социальных и экономических факторов и есть реализованный пример системного проектирования вентиляции [114]. Здесь от глобальной системы проветривания идёт переход к участковому и затем – к элементному проектированию вентиляции и решению вопросов по обеспечению безопасности.

6.4. Реализация системного проектирования вентиляции на примере коммуникационных коллекторов города Москвы

Для верификации моделей и апробации разрабатываемой Методологии в рамках выполнения хоздоговорных работ с ГУП «Москоллектор» в течение двух лет были проведены натурные измерения, численные расчёты, предложены и внедрены технические решения по улучшению проветривания коммуникационных коллекторов г. Москвы, а также разработан внутренний стандарт организации «Проектирование системы отопления, вентиляции и кондиционирования в коммуникационных коллекторах» [169].

Организация проветривания коммуникационных коллекторов простая. Схема проветривания коммуникационных коллекторов – прямоточная, способ проветривания – нагнетательный. Вентиляционные шахты коммуникационных коллекторов имеют круглую или прямоугольную форму сечения. В ряде случаев в коммуникационных коллекторах проложен водопровод с горячей водой, что в отопительный сезон приводит к резкому повышению температуры. Некоторые из них пересекают газопроводы, что при авариях (утечках газа) может привести к загазированию коллектора. Также загазирование возможно в случае попадания тяжёлых газов (от автомобилей) из атмосферы и выделения вредных газов из грунтовых вод. Эти факторы относятся к аэрологическим и влияют на безопасность эксплуатации коммуникационных коллекторов. При проведении работ исследовались процессы проветривания коллекторов за счёт принудительной приточной вентиляции и за счёт естественной тяги. Анализировались влияние перепада температуры у вентиляционных шахт и угла наклона коммуникационного коллектора на естественную тягу. Для анализа была построена трёхмерная геометрическая модель коммуникационного коллектора прямоугольной формы поперечного сечения (рисунок 6.15).

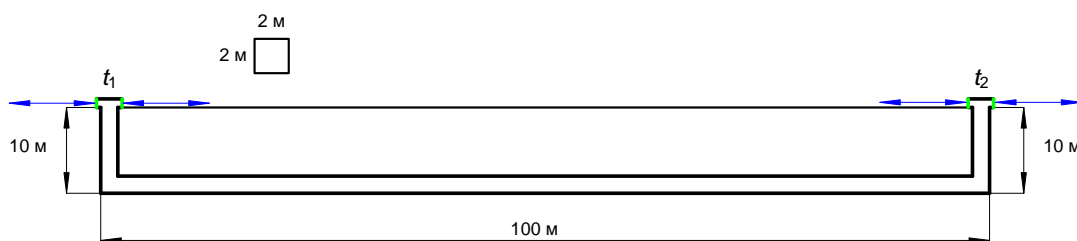


Рисунок 6.15 – Схема проветривания коммуникационного коллектора

В результате расчётов был получен массив данных, который анализировался путём построения изолиний тока движения воздуха, контрольных сечений (продольных и поперечных) с отображением на них избыточного давления (рисунок 6.16) и скорости движения воздуха (рисунок 6.17), а также графики по характерным линиям (рисунок 6.18), по которым проводились натурные измрения для верификации полученных моделей с целью дальнейшей проработки проектных решений по улучшению провтеривания.

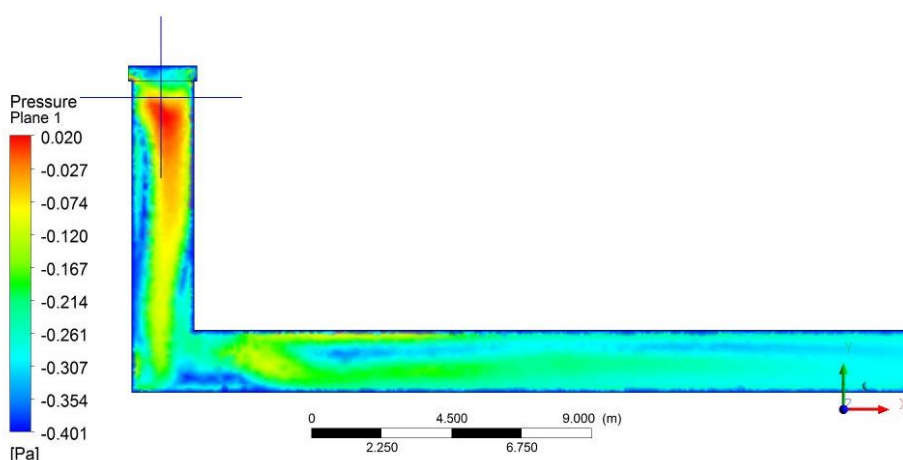


Рисунок 6.16 – Результаты расчёта распределения избыточного давления воздуха по продольному сечению коммуникационного коллектора на поступающей струе воздуха

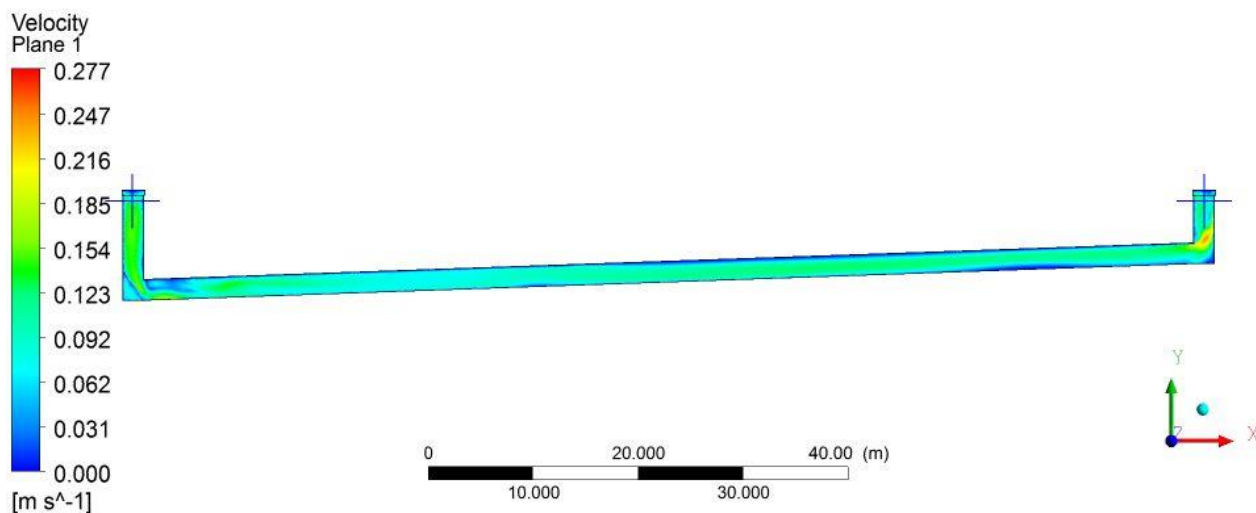


Рисунок 6.17 – Результаты расчёта распределения скорости движения воздуха по продольному сечению коммуникационного коллектора

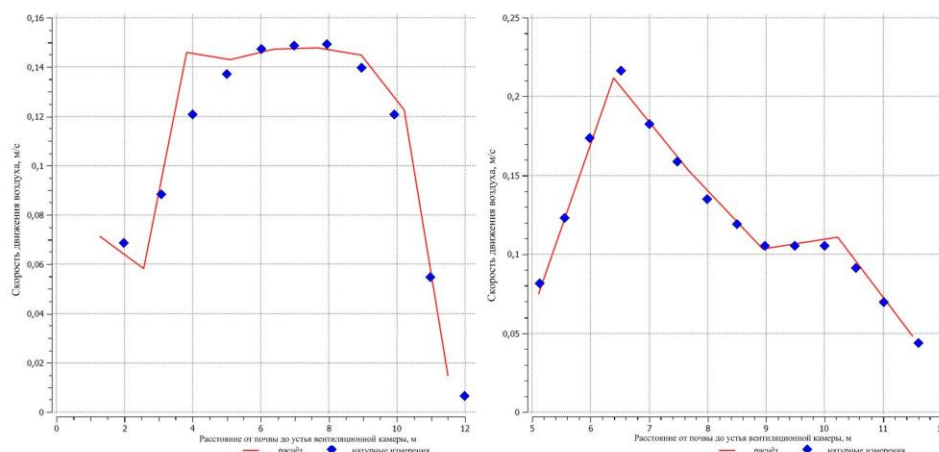


Рисунок 6.18 – Изменения скорости движения воздуха в вентиляционной и воздухоподающей шахтах коммуникационного коллектора

Для изучения процессов выноса примесей анализируются вектора скорости движения воздуха (рисунок 6.19 и 6.20), размер вектора и его цвет характеризуют величину скорости и направление потока.

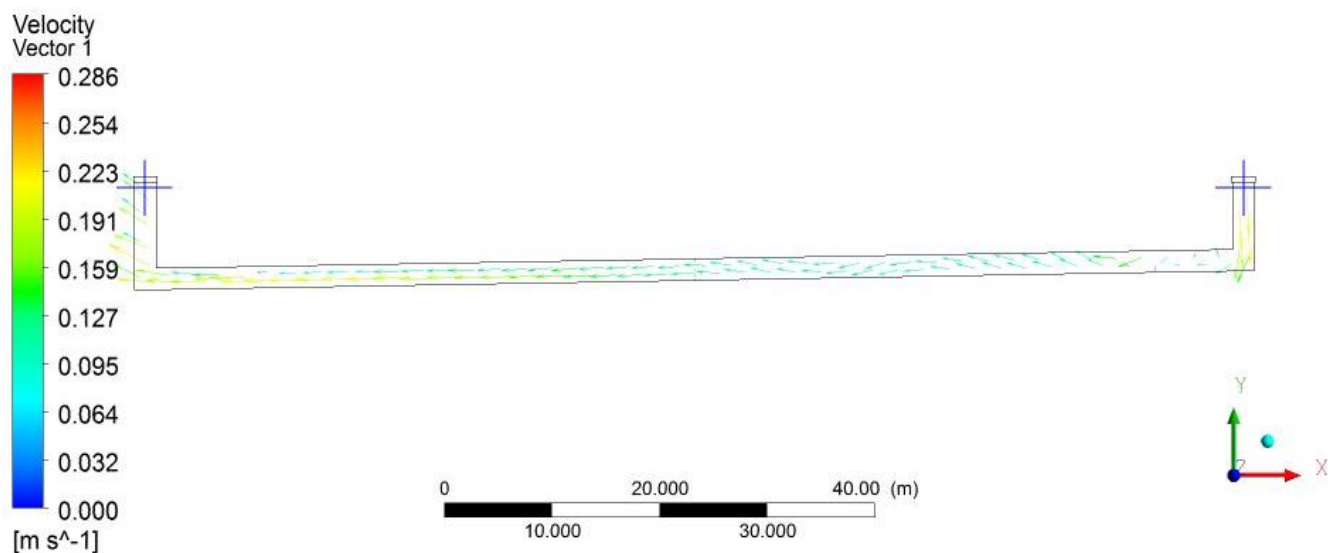


Рисунок 6.19 – Результаты расчёта распределения векторов скорости движения воздуха по продольному сечению коммуникационного коллектора

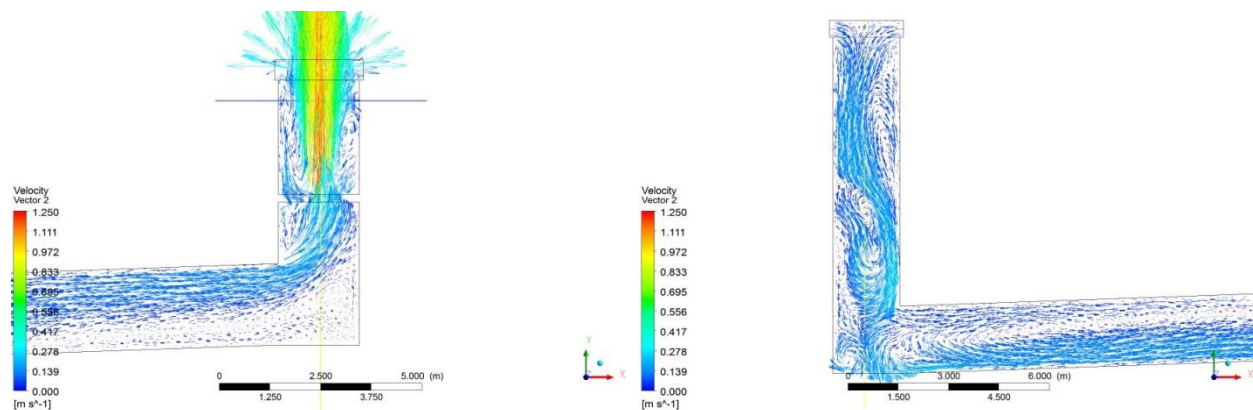


Рисунок 6.20 – Результаты расчёта распределения векторов скорости движения воздуха (укрупнённо в местах сопряжения коммуникационного коллектора с вентиляционной шахтой)

Анализ распределения векторов позволяет выявить локальные зоны, в которых низкие скорости движения воздуха являются постоянными вне зависимости от параметров проветривания.

На более детальном уровне изучения параметров проветривания коммуникационных коллекторов проводились исследования по распределению внутренних утечек при работе вентиляторов. В верхней части вентиляционной шахты коммуникационного коллектора расположен вентилятор, который подаёт воздух по воздуховоду, круглой или прямоугольной формы сечения, в коммуникационный коллектор. Воздух попадает в верхнюю часть

вентиляционной шахты коммуникационного коллектора через вентиляционный домик, расположенный на поверхности. Между этажами вентиляционных шахт коммуникационных коллекторов имеется отверстие или лаз, через который проходят утечки, и образуется рециркуляция (рисунок 6.21).

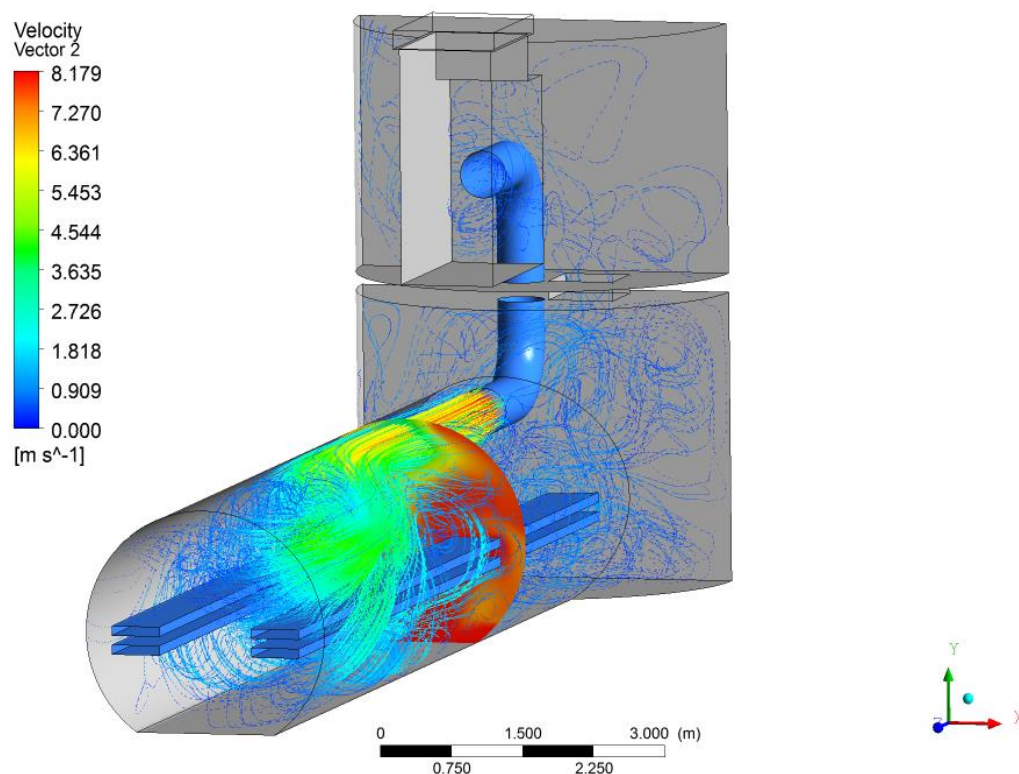


Рисунок 6.21 – Расчётное распределение утечек воздуха и расчёт рециркуляции

При проведении натурных измерений были зафиксированы в вентиляционных шахтах коммуникационных коллекторов противотоки, т.е. в одной и той же горной выработке воздушные потоки разделяются: часть идёт вниз, другая поднимается вверх. Это явление естественной тяги также было рассчитано при использовании разработанной модели (рисунок 6.22).

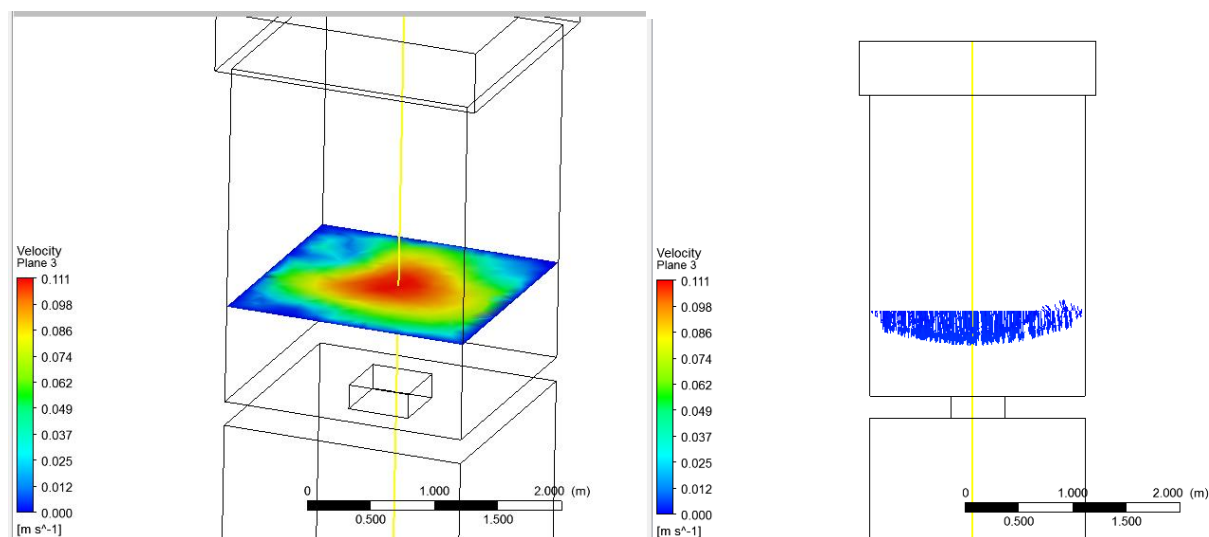


Рисунок 6.22 – Расчётные значения противотока в вентиляционной шахте

Результаты работы позволили выявить «узкие» места проветривания коммуникационных коллекторов, предложить технологические решения для устранения утечек воздуха, учёта естественной тяги для улучшения проветривания, а также разработать рекомендации по проектированию вентиляции коммуникационных коллекторов города Москвы, которые были учтены при разработке Стандарта организации «Проектирование системы отопления, вентиляции и кондиционирования в коммуникационных коллекторах» [231].

6.5. Моделирование аварийных ситуаций в экспертных целях

Аварийные ситуации (АС), связанные с аэрологическими факторами, возникают на горных предприятиях регулярно. К ним относятся: нарушения проветривания; загазирования; выделение пожарных газов; вспышки, взрывы газа и пыли. Вспышки метана и загазирования часто не учитываются официальной статистикой. Действующими нормативными положениями не установлено понятие загазирование. К ним следует относить превышение любого из нормированных Правилами газов, образующихся при работе машин

с двигателями внутреннего сгорания, после проведения взрывных работ, огневых работ и т.д.

Также к АС следует относить изменения состава атмосферы связанные с возникновением эндогенных пожаров. Они трудноопределимы и часто возникают повторные самовозгорания «списанных» ранее пожаров. Успех локализации и ликвидации эндогенных пожаров зависит от оперативности их обнаружения. Существующие способы обнаружения эндогенных пожаров [112], хотя и описываются в специальной литературе, не надежны, т.к. зависят от наблюдательности горных инженеров и горнорабочих. При этом у них должны быть специальные знания и опыт работ на шахтах, опасных по самовозгоранию [95].

Существенную роль играют принятые технологические решения по обеспечению эндогенной пожарной безопасности [59, 60]. «Все существующие способы требуют присутствия в месте набора проб человека. При всём многообразии схем разработки месторождений, наличии газодренажных горных выработок, дегазации и газоотсоса определить места отбора проб с учётом интенсивного развития горных работ и, главное, добраться к этим местам бывает весьма затруднительно, а порой и невозможно» [95].

Применяемые в системах автоматического мониторинга пожарных газов физические методы [53, 110] позволяют определить наличие эндогенного пожара по наличию в рудничной атмосфере оксида азота, углекислого газа, оксидов азота, водорода, метана и кислорода, изменению температуры и влажности.

Источником выделения газов индикаторов чаще всего являются выработанные пространства, в которых и развиваются процессы самонагревания и возгорания.

Выработанное пространство играет большую роль в обеспечении пожаровзрывобезопасности угольных шахт, однако, как сказано ранее, процессы фильтрации газовойдушной смеси через обрушенные породы исследованы не в полной мере ввиду сложности натурных измерений. В

настоящее время активно и успешно развивается компьютерное моделирование различных аэрогазодинамических процессов для горных предприятий [295-298], в том числе и нестационарных. Для определения мест вероятных скоплений опасных газов и распределения утечек воздуха в выработанном пространстве также можно применить разработанный методологический подход системного проектирования. В расчёте учитываются сложные переходные аэрогазодинамические процессы, связанные с поступлением утечек воздуха из горных выработок в выработанное пространство.

Предлагаемый принцип оценки эндогенной пожароопасности и определения зон, опасных по возникновению очага пожара основывается на расчете распределения скоростей фильтрации воздуха и выделении областей опасного диапазона [193, 195], поскольку при низкотемпературном окислении причиной самонагревания угольной мелочи является скорость фильтрации в пределах от 10^{-5} до 10^{-3} м/с через эти скопления.

Заложенные в программном обеспечении описания фильтрации воздуха через пористую среду с переменными характеристиками, включающие массоперенос в турбулентном и ламинарном режимах [107], позволяют с высокой достоверностью определить области со скоростями, при которых возникают эндогенные пожары, места скопления и выноса утечками из выработанного пространства метана (рисунок 6.23), а также места выноса пожарных газов (рисунок 6.24).

По результатам, представленным в графическом виде можно определить места скопления метана в куполах выработанного пространства для целенаправленного бурения дегазационных скважин и места выноса метана в дренажную выработку.

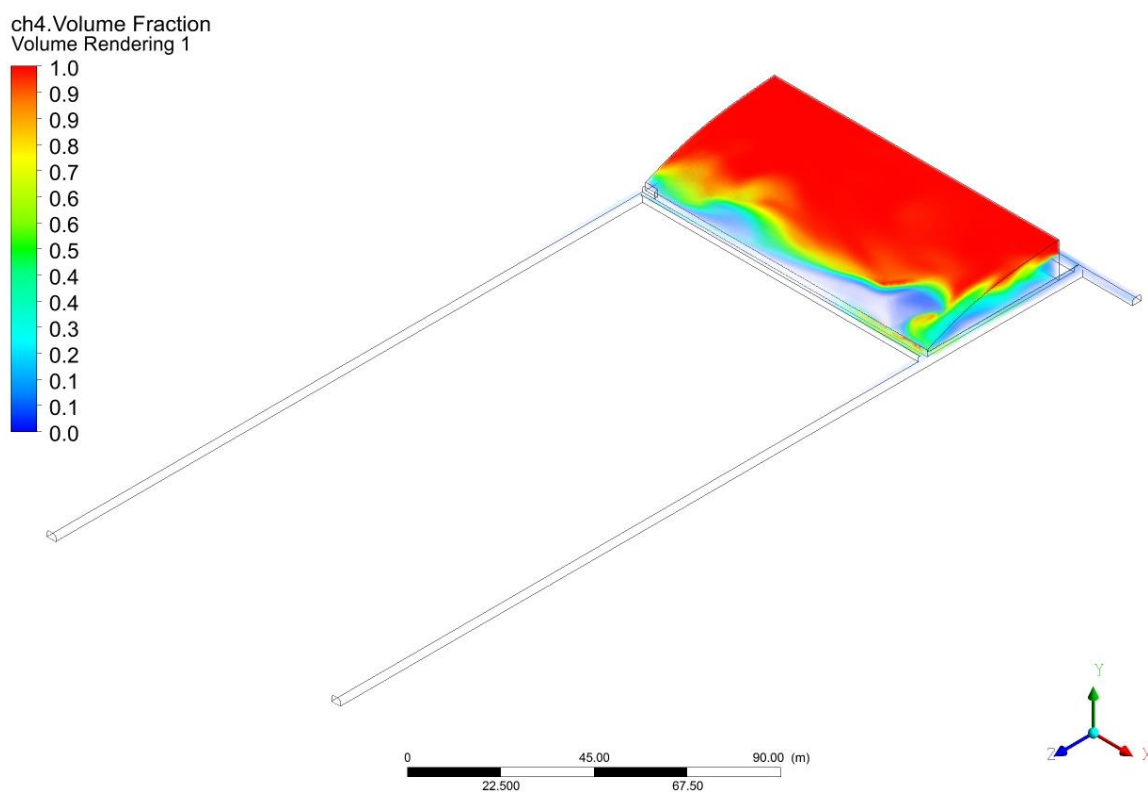


Рисунок 6.23 – Распределение метана в выработанном пространстве и места выноса метана из выработанного пространства

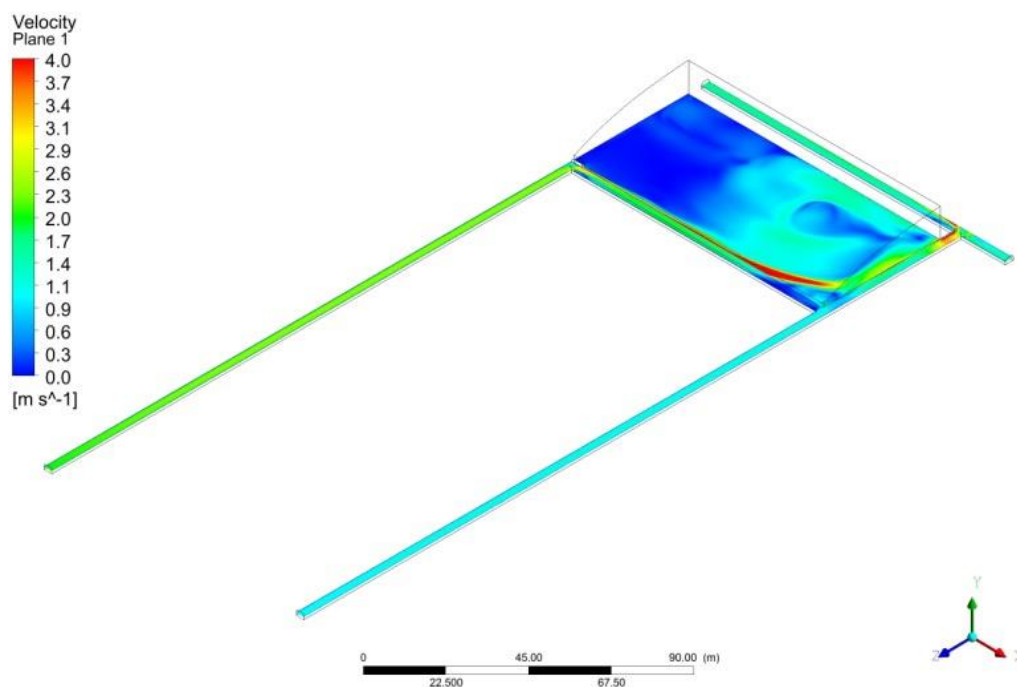


Рисунок 6.24 – Визуализация распределения скорости движения воздуха в выработанном пространстве выемочного участка и мест выноса утечек воздуха на газодренажном штреке

На основе трёхмерного компьютерного моделирования по сформулированным принципам системного проектирования, в дополнение к имеющимся способам расчёта параметров взрыва, предлагается новый способ расчёта распространения ударно-воздушной волны (УВВ) [96]. В процессе расчёта создаются трёхмерные аналоги выемочных и проходческих участков или вся шахта целиком. В области горной выработки или в выработке целиком задаётся избыточное давление (скачок давления), соответствующий первоначальным исходным данным: объём загазированной горной выработки или выработок, концентрация метана. Выделяемая область соответствует области загазирования (запылённости), в которой происходит формирование УВВ. Далее предполагается, что горение не происходит, а только движется фронт УВВ. Расчёт предлагается проводить исходя из того, что взрыв произошёл при наличии стехиометрической смеси (9,5% по объёму). При этом величину избыточного давления можно определить по методике, описанной в приложении 22 и 21 Устава ВГСЧ [185]. Далее производится расчёт системы уравнений методом конечных элементов в нестационарной постановке, т.е. с параметрами, изменяющимися во времени. Это позволяет определить величину избыточного давления в любой точке, в любом промежутке времени. Результаты расчёта могут быть представлены в виде видеороликов, кадров по времени (распределения УВВ по произвольному сечению, рисунок 6.25), в графическом виде, табличном и т.д.

Данный способ расчёта параметров УВВ весьма информативен. В любой точке горной выработки можно получить величину избыточного давления и время воздействия её на человека. По этим данным можно судить о возможной степени травмирования людей. Он позволяет оценить не только «прямое» движение УВВ с затуханием давления, но и рассчитать отражённую УВВ, учитывает наложение нескольких волн и т.п. Аналогии данного способа расчёта в зарубежной литературе по горноспасательному делу [355, 337, 339] отсутствуют. Также следует отметить отсутствие методической информации в

зарубежной литературе по проведению инженерно-тактических расчётов по оперативным задачам горноспасательного дела.

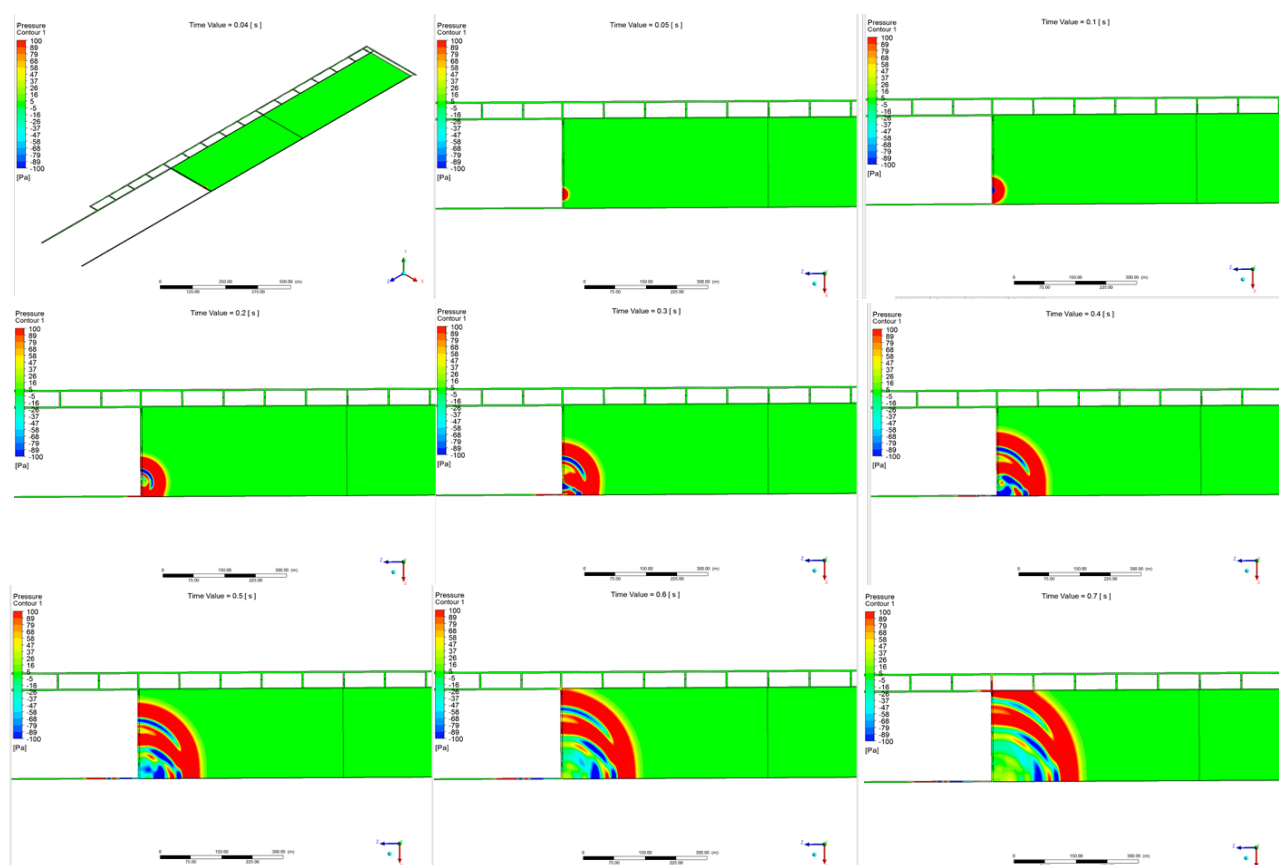


Рисунок 6.25 – Пример графического представления результатов расчёта распространения УВВ

Проведённые верификационные исследования показали, что моделирование может быть использовано в экспертных целях и при тактических инженерных расчётах по горноспасательным работам при развитии данного направления.

6.6. Дополнительные возможности методологии системного проектирования вентиляционных устройств

Проводимые научные исследования в рамках создания методологических основ по системному проектированию вентиляции шахт при использовании

разработанных подходов, алгоритма и принципов построения моделей – виртуальных аналогов аэрогазодинамических систем – позволили найти новый способ создания вентиляционных устройств.

Сегодня современные технологии проектирования позволяют создавать вентиляторы под заданный диапазон параметров, например, таких как депрессия, расход воздуха и даже потребляемая мощность. Данные технологии активно используются в различных областях промышленности при создании самолетов, кораблей, автомобилей и т.д. В основе данной технологии лежит трёхмерное моделирование статических и динамических процессов, протекающих как в самом вентиляторе, так и в окружающей его среде. Как правило, моделируются все движущиеся части вентилятора, его лопасти, ротор, и неподвижные части – выпрямляющие лопасти и статор (рисунок 6.26), при этом изучаются все процессы, связанные с распределением давлений, скорости движения воздуха, температуры как внутри установки, так и снаружи (рисунок 6.26).

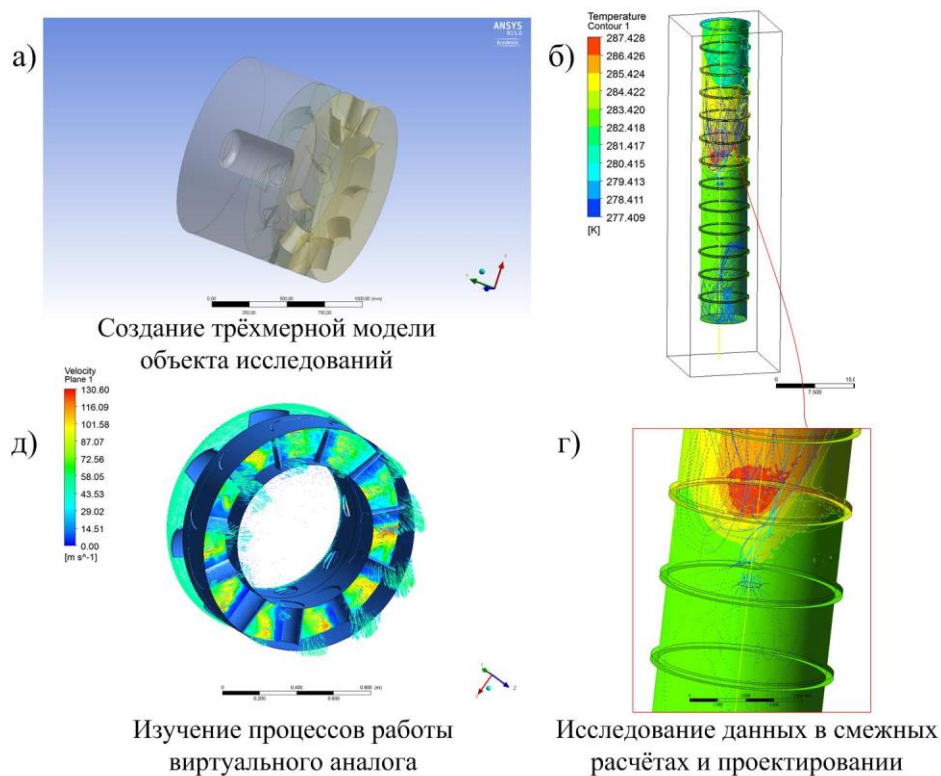


Рисунок 6.26 – Результаты комбинирования расчётов параметров вентиляционных устройств и объекта проветривания

Полученные результаты моделирования могут быть использованы как начальные условия для последующих расчётов. Это позволит повысить качество принимаемых проектных решений на этапе участкового и элементного проектирования вентиляции.

Дополнительным направлением развития разработанной методологии является создание новых вентиляционных устройств и совершенствование применяемых. Объёмное моделирование позволяет создавать из виртуальных аналогов физические устройства путём 3D-печати (рисунок 6.27) без дополнительных затрат на конструкторскую документацию.

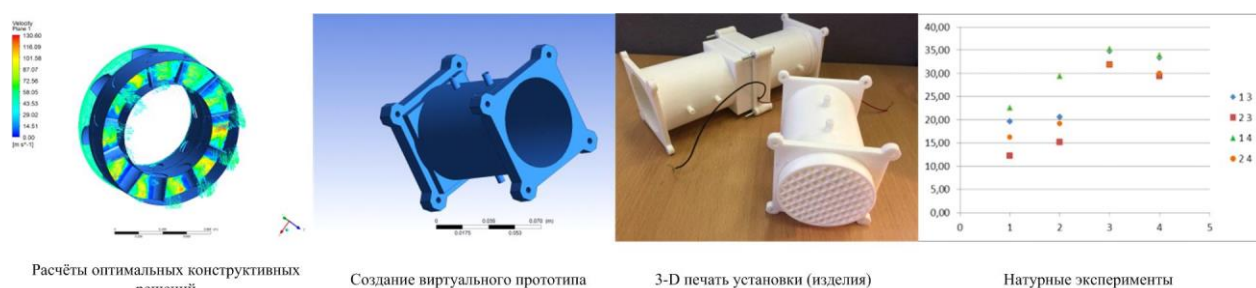


Рисунок 6.27 – Порядок создания новых вентиляционных устройств

По данному направлению проведён ряд научно-исследовательских работ по созданию новых вентиляционных устройств для повышения уровня контроля параметров рудничной атмосферы [201], созданию новых устройств проветривания горных выработок [104, 89, 62] и по повышению эффективности применяемых в настоящее время [48, 116].

6.7. Рекомендации по совершенствованию организации и нормативной базы проектирования вентиляции

Системное проектирование вентиляции шахт и рудников должно лечь в основу нормативных документов по расчётам, выбору схем и способов проветривания, выбора методов управления газовыделением, подбору вентиляционного оборудования и конструированию вентиляционных сооружений. Системное проектирование в рамках решения задач подсистем

должно лежать в основе разработки мероприятий по недопущению образования скоплений газов, локальному повышению температуры, мероприятиям по снижению запылённости и т.п.

Для подготовки нормативно-правовой базы по системному проектированию вентиляции должна быть проведена большая предварительная работа, включающая подготовку соответствующих высококвалифицированных горных инженеров, задача которых – стать универсальными специалистами, владеющими в совершенстве не только знаниями в области подготовки месторождения к добыче и ведению горных работ, но и в области трёхмерного компьютерного моделирования и выполнения на базе таких расчётов обоснование оптимальных решений по организации, совершенствованию и управлению проветриванием.

Соответствующими специалистами должно осуществляться оперативное планирование развития горных работ на основе созданных и поддерживаемых виртуальных аналогов шахтной системы вентиляции.

Данные, получаемые на основе создания виртуальных аналогов подземных аэрогазодинамических систем при моделировании, могут приниматься как обоснование принимаемых технологических решений.

Для применения разработанной методологии системного проектирования вентиляции шахт необходимо создать информационную базу, которая должна пополняться при проведении геологоразведочных и горных работ. Своевременное пополнение базы и уточнение характеристик (физико-механические, физико-химические свойства, фильтрационные характеристики пород и выработанного пространства (пористость, макрошероховатость, проницаемость) и т.д.).

Системное проектирование вентиляции горных предприятий подразумевает оперативное сопровождение (на всех стадиях проектирования, строительства, эксплуатации и ликвидации) принимаемых решений по проветриванию с учётом контроля изменений горно-геологических, технологических, климатических условий.

Выводы

Разработанный методологический подход системного проектирования вентиляции был апробирован на разных объектах ведения горных работ, при строительстве и эксплуатации подземных сооружений.

На основе выполненных исследований были разработаны и внедрены различные технологические решения по улучшению вентиляции, выбору схем и способов проветривания тупиковых горных выработок, снижению температуры и эффективности специальных мероприятий по улучшению разбавления образующихся при ведении взрывных работ газов для элементов вентиляционной сети шахты «Эстония», шахты им. С.М. Кирова, комплекса горных выработок при строительстве шахты «Глубокая» рудника «Скалистый», коммуникационных коллекторов города Москвы.

Результаты исследований на протяжении четырёх лет апробировались на горных работах при строительстве двух уникальных объектов в мире – двух стволов рудника «Скалистый» шахты «Глубокая» в Норильске. При окончательной длине Вентиляционного и Скипового стволов в 2055,5 метров в сложных горно-геологических и климатических условиях. Решались задачи влияния высоких температур, связанных с глубиной ведения горных работ, тумано- и льдообразования, влияния естественной тяги на проветривание. Также изучались вопросы улучшения проветривания после взрывных работ, выноса тяжёлых газов, и возможное их попадание в примыкающие к стволу выработки. Изучались вопросы работы новых технических устройств, применяемых для проветривания горных выработок. Были определены режимы и схемы проветривания, обеспечивающие на более высоком уровне аэрологическую безопасность.

В полном комплексе разработанных решений системное проектирование вентиляции было применено к подземным объектам ГУП «Москоллектор». По существующим объектам были проведены обследования и натурные измерения параметров проветривания, определены фактические геометрические

параметры коммуникационных коллекторов, а также вредных и опасных аэрологических факторов. Для фиксирования природных явлений (естественной тяги) был проведён мониторинг параметров рудничной атмосферы. На основе полученных измерений, была сформирована база исходных данных. Она использовалась в качестве граничных и начальных условий при трёхмерном моделировании аэрогазодинамических процессов. В результате работ созданы компьютерные аналоги подземных аэрогазодинамических систем, которые использовались для разработки решений по улучшению проветривания. Результаты работы легли в основу подготовки к созданию внутреннего нормативного документа (Стандарт организации [293]) для дальнейшего проектирования при строительстве и эксплуатации коммуникационных коллекторов города Москвы.

Проведённые исследования показали высокую точность (расхождение менее 10%) и адекватность моделей, построенных по предложенной методологии.

Новым направлением в разработанной методологии системного проектирования вентиляции горных предприятий является создание новых вентиляционных. Данная методология позволяет создавать сначала виртуальные аналоги устройств, анализировать их работу при разных режимах и при различных условиях, а затем при использовать новейшие технологии по 3D-печати без сложных токарных, плавильных и т.п. работ, создавать прототипы и целые серии экземпляров. Данное направление в методологии найдёт широкое применение в научных и учебных целях.

Заключение

Диссертация является законченной научной-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная проблема разработки и создания методологии системного проектирования вентиляции горных предприятий, включающей методическое и алгоритмическое обеспечение, позволяющее повысить качество проектов и обеспечить требования аэрологической безопасности в период эксплуатации горных объектов.

Основные научные результаты, полученные лично автором:

1. Проведённые исследования показали несоответствие состояния методологии проектирования вентиляции горных предприятий современным технологиям ведения горных работ, применяемым новым видам оборудования (горного и вентиляционного) и горно-геологическим условиям. В работе доказано, что существующее состояние приводит к ошибкам в проектировании, недостаточному уровню подготовки кадров, снижению обоснованности требований в нормативных документах, и в конечном итоге – к катастрофам на горных предприятиях, в том числе с человеческими жертвами, тяжёлыми социальными и экологическим последствиями, большому материальному ущербу и потере полезных ископаемых.
2. На основании выполненных исследований сформулировано понятие системного проектирования вентиляции горных предприятий, под которым подразумевается проектирование проветривания на базе созданных виртуальных аналогов подземных аэрогазодинамических систем.
3. Предложенная методология системного проектирования вентиляции шахт базируется на общепринятом повсеместно применяемом в настоящее время «классическом» проектировании проветривания горных предприятий и дополнена новым подходом проведения расчётов с применением трехмерного моделирования. Разработанный новый подход

представляет собой инструментарий не только для определения параметров систем вентиляции при проектировании, но и для исследований сложных аэрогазотермодинамических процессов, протекающих в рудничной атмосфере.

4. Разработан алгоритм системного проектирования вентиляции шахт, единый для всех типов горных предприятий. Он учитывает внутренние и внешние факторы, как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации. К этим факторам относятся: геологические, технологические, экономические, климатические (атмосферные), а также субъективные (в том числе, административные и человеческий).
5. Разработан методический подход к созданию единой универсальной модели – виртуального аналога подземной аэрогазодинамической системы, которая применима к любому подземному горному объекту: горным выработкам, подготовительным и очистным забоям, тоннелям, подземным горным системам в целом. На основе разработанной модели возможно осуществлять:
 - совместное проектирование проветривания шахт, с дегазацией и газоотсосом в системе горные выработки – выработанное пространство с единовременным учётом двухкомпонентной рудничной атмосферы (воздух и метан);
 - прогноз естественной тяги при проектировании вентиляции горных предприятий и подземных сооружений;
 - определение параметров аварийных ситуаций загазирования тупиковых горных выработок;
 - проектирование вентиляционных устройств и оборудования.
6. Разработанная методология системного проектирования вентиляции позволяет повысить уровень аэрологической безопасности принимаемых технических решений при ведении горных работ за счёт проработки большего количества сценариев при многовариантном изменении влияющих параметров.

7. Использование разработанной методологии должно быть интегрировано с процессом подготовки высококвалифицированных кадров для горных предприятий. Использование моделей позволят наглядно объяснять особенности протекания аэрогазотермодинамических процессов в горных выработках при различных способах и схемах проветривания и управления газовыделением. Новый методологический подход позволяет повысить уровень восприятия информации о сложных физических процессах, происходящих при проветривании за счёт применения виртуальных аналогов подземных аэрогазотермодинамических аналогов.
8. Преимущество разработанной методологии системного проектирования вентиляции состоит в повышении качества принимаемых технических решений по аэрологической безопасности ведения горных работ за счёт проработки большего количества вариантов при многовариантном изменении влияющих параметров, а также обеспечении научного обоснованию экспертных оценок принимаемых решений в области проветривания горных объектов, как в штатных, так и в аварийных ситуациях.
9. Полученные результаты успешно прошли апробацию и внедрение на:
 - угольной шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс»;
 - сланцевой шахте «Эстония» компании Eesti Energia (АО «Ээсти Энергия Каэвандусед»);
 - объектах строительства стволов ВС-10 и СКС-1 с сопряжениями примыкающих выработок горизонтов и выработками околоствольного двора рудника «Скалистый», шахты «Глубокая» ЗАО «Норильский Никель»;
 - коммуникационных коллекторах г. Москвы,что позволило
 - обеспечить эффективное проветривание в соответствии с требованиями ПБ;

- повысить качество проектных решений по проветриванию и безопасность ведения горных работ по аэрологическим факторам;
- снизить затраты на систему вентиляции горных объектов за счет оптимизации схем и способов проветривания.

Основные направления дальнейших исследований:

- разработка методов прогнозирования и расчёта естественной тяги;
- изучение процессов тепломассопереноса с определением условий фазовых переходов (тумано- и льдообразование) в рудничной атмосфере;
- изучение аэродинамических сопротивлений горных выработок сложной конфигурации (местные и лобовые сопротивления);
- разработка новых схем и способов управления газовыделением на выемочных участках угольных шахт и оценка их эффективности;
- разработка новых вентиляционных устройств и приборов, позволяющих существенно повысить аэрологическую безопасность;
- разработка моделей развития аварийных ситуаций для повышения безопасности ведения горноспасательных работ;
- разработка научно-методической базы по проектированию вентиляции горных предприятий.

Список сокращений и условных обозначений

А – категория запасов угля

авт. – авторское

АОТ – Аэрология и охрана труда

АТБиГД – Аэрология, технологическая безопасность и горноспасательное дело

АС – аварийная ситуация

БЭГП – Безопасность и экология горного производства

В – категория запасов угля

ВВ – взрывчатые вещества

ВГСЧ – военизированная горноспасательная часть

ВП – выработанное пространство

г. – год (а)

ГИ – горный институт

ГОУ – газоотсасывающие установки

ДВС – двигатель внутреннего сгорания

ИПКОН РАН – Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук

КПД – коэффициент полезного действия

ЛГИ – Ленинградский горный институт

МГГУ – Московский государственный горный университет

МГИ – Московский горный институт

НИР – научно-исследовательская работа

НЦ – научный центр

о. – остров

ПБ – правила безопасности

Р₁ – категория запасов угля

Р₂ – категория запасов угля

Р₃ – категория запасов угля

С₁ – категория запасов угля

С₂ – категория запасов угля предварительно оцененных

т.д. — так далее

т.е. — то есть

т.п. — тому подобное

Словарь терминов

Аэрология (в горной промышленности) или **рудничная аэрология** – область науки, занимающейся вопросами получения новых знаний о процессах проветривания горных предприятий, развития приборов техники применяемых при вентиляции.

Вентиляция (в горной промышленности) – процесс удаления загрязненного воздуха.

Загазирование (в горной промышленности) – превышение предельной допустимой концентрации газа не ограниченное временем.

Мёртвый воздух (в горной промышленности) – смесь углекислого газа и азота выше нормальных значений для $\text{CO}_2 = 0,04 \text{ \%об.}$, для $\text{N}_2 = 78 \text{ \%об.}$

Проветривание (в горной промышленности) – процесс подачи чистого воздуха.

Углекислотообильность (в горной промышленности) – количество углекислого газа, выделяющегося в горные выработки. Различают У.в. абсолютную – количество газа, выделившегося в единицу времени ($\text{м}^3/\text{мин}$ или $\text{м}^3/\text{сут}$), и относительную – количество газа, выделившегося за определенное время и отнесенное к единице массы или объема угля, добытого за этот же период ($\text{м}^3/\text{т}$ или $\text{м}^3/\text{м}^3$). (авт. Кудряшов В.В., Матвиенко Г.Н. [204])

Шахтные газы – природные газы, содержащиеся в угольных пластах или вмещающих их породах, а также образующие в результате химических и биохимических реакций, протекающих между воздухом и полезными ископаемыми, вмещающими его породами, крепью, или являющиеся продуктами сгорания взрывчатых и горючих веществ, дыхания людей, работы машин и механизмов, шахтных пожаров, взрывов газов и пыли т.д. (авт. Кудряшов В.В., Матвиенко Г.Н. [204])

Ядовитые (токсичные) газы (в горной промышленности) – газо- и парообразные вещества, вызывающие при воздействии на живые организмы резкое нарушение нормальной жизнедеятельности, приводящее к отравлению или смерти (авт. Кудряшов В.В., Матвиенко Г.Н. [204])

Естественная тяга (в горной промышленности) – движение воздуха по горным выработкам при отсутствии или бездействии механических средств проветривания шахты или рудника (авт. Клебанов Ф.С. [204])

Суфлярные выделения метана – локальные выделения газа из природных или эксплуатационных трещин в горных выработках с дебитом не менее $1 \text{ м}^3/\text{мин.}$ (авт. Морев А.М. [204])

Тепловой режим (в горной промышленности) – метеорологическое состояние горных выработок, сложившееся в результате протекания в них тепло- и массообменных процессов (авт. Морев А.М. [204])

Устойчивость проветривания (в горной промышленности) – способность вентиляционной струи сохранять заданные расход и направление движения воздуха при изменении аэродинамических параметров вентиляционной сети (авт. Романченко С.Б. [204])

Пылеулавливание (в горной промышленности) – удаление пыли от мест ее выделения путем отсоса и последующего осаждения в пылеуловителях (авт. Поздняков Г.А. [204])

Пылевентиляционная служба (в горной промышленности) – подразделение на шахте, занимающееся обеспечением эффективного проветривания горных выработок, газо- и пылевзрывозащитой шахт (авт. Кирин Б.Ф. [204])

Пылеотсос (в горной промышленности) – отсасывание запыленного воздуха от мест образования пыли (из забоя выработки, устья скважины, шпура, места погрузки и перегрузки горной массы и др.) (авт. Кирин Б.Ф. [204, 227])

Пылевыведение (в горной промышленности) – поступление пыли в выработки во взвешенном состоянии (авт. Кирин Б.Ф. [204, 179])

Природная газоносность (в горной промышленности) – объемное количество газов, содержащихся в природных условиях в весовой или объемной единице угля ($\text{м}^3/\text{т}$; $\text{м}^3/\text{м}^3$) в свободной, адсорбированной и в растворенной в угле форме (авт. А.Т. Айруни [204])

Углекисло-азотная (воздушная) зона – зона распространения в земной коре природных газов воздушно-химических и биохимических процессов,

протекающих в биосфере и в угленосных отложениях при окислении угольного вещества атмосферным и растворенным в подземных водах кислородом (авт. А.Т. Айруни [204])

Шахтная пыль – дисперсная система, состоящая из частиц различных горных пород и угля разнообразной формы, размера и физико-химических свойств, образующихся в результате производственной деятельности в шахте (авт. Кирин Б.Ф. [204])

Сланцевый заслон – ряд опрокидываемых полок с инертной пылью на них, устанавливаемых под кровлей горной выработки для локализации взрывов пыле-газо-воздушной среды на определенном участке горной выработки (авт. Кирин Б.Ф. [204])

Пылевая динамика шахт – раздел шахтной аэрологии, изучающий процессы перемещения пыли в шахтных вентиляционных потоках (авт. Кирин Б.Ф. [204])

Пассивные газы – газы, присутствие которых в воздушном потоке не изменяет диффузионных свойств последнего к ним относятся газы, плотность которых близка к плотности воздуха (в шахтах – азот, оксид углерода, кислород, формальдегид) (авт. Ушаков К.З. [204])

Поступающая струя, свежая струя – поток воздуха в подземных горных выработках, воздухопроводах горных предприятий, химический состав которого, несущественно отличается от состава чистого атмосферного воздуха (авт. Ушаков К.З. [204])

Проектирование вентиляции шахт – разработка комплексной документации (проекта) для организации вентиляции шахты (авт. Ушаков К.З. [204])

Пульсирующая вентиляция – вентиляция горных выработок воздушным потоком с распространяющимися по нему импульсами повышенного давления (авт. Ушаков К.З. [204])

Рециркуляция воздуха – многократное движение одного и того же объёма воздуха по замкнутому контуру (авт. Ушаков К.З. [204, 177])

Ричардсона число Ri – мера отношения сил гравитации к силе турбулентных пульсаций (авт. Ушаков К.З. [204])

Статическое давления воздуха – нормальная поверхностная сила, действующая на единицу площади и обусловленная статическими причинами (вес груза, давление поршня и т.п.) (авт. Ушаков К.З. [204])

Слоевое скопление метана – область воздушного потока под кровлей выработки длиной свыше 2 м с концентрацией метана, существенно превышающей среднюю по сечению выработки (авт. Ушаков К.З. [204])

Шахтная (рудничная) атмосфера – смесь атмосферного воздуха и газов, выделяющихся в шахте, заполняющая горные выработки

Дегазация – совокупность мероприятий направленных на извлечение метана из разрабатываемого пласта, вмещающих пород и/или пластов спутников, минуя рудничную атмосферу для обеспечения безопасности ведения горных работ, снижения вреда экологии и использования шахтного метана, как энергетического ресурса (из лекций Сластунова С.В.)

Жесткость микроклимата – совокупность параметров микроклимата, при которых возникают простудные заболевания (катар верхних дыхательных путей, грипп, радикулит, ангина, бронхит) (авт. Дядькин Ю.Д. [229])

Бесполезные утечки воздуха – часть утечек через выработанное пространство, которая разжижает в нём метан в пределах участка от 1 % и ниже (авт. Харёв А.А. [229])

Нормальные условия – стандартные физические условия, с которыми сопоставляют свойства веществ (Standard temperature and pressure, STP). Нормальные условия определены Международным союзом чистой и прикладной химии (IUPAC) следующим образом [343]: атмосферное давление $101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$, температура воздуха $273,15 \text{ К} = 0^\circ \text{ С}$.

Выработанное пространство – пространство, образующееся после извлечения полезного ископаемого в результате ведения очистных работ.

Метановыделение – процесс поступления газа из какого-либо источника в горные выработки (скважины).

Газовый баланс – распределение газовыделения по источникам поступления газа или системе горных выработок в пределах объекта (шахта, крыло, выемочный участок, очистной забой и др.).

Газовый дренаж – удаление газа из угольных пластов и пород по искусственным (скважины, дренажные выработки и др.) или естественным (трещины) каналам.

Метаноносность – количество (объём) метана, содержащегося в массовой или объёмной единице полезного ископаемого и горной породы в свободном и связанном состоянии, $\text{м}^3/\text{т}$; $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Метанообильность выработок – количество (объём) метана, выделяющегося в горные выработки. Различают абсолютную метанообильность - дебит метана в горные выработки в единицу времени, $\text{м}^3/\text{сут}$ или $\text{м}^3/\text{мин}$ и относительную метанообильность – количество (объём) метана, выделившегося за единицу времени в горные выработки и отнесенного к единице массы или объема угля или породы, добытых за этот же период ($\text{м}^3/\text{т}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$).

Газоотсасывающая установка – газоотсасывающий вентилятор или вакуум-насосная установка, предназначенная для удаления метановоздушной смеси из выработанных пространств действующих и изолированных выемочных участков с концентрацией метана от 0 до 100%.

Газодренажная выработка – неконтролируемая выработка специального назначения, изолированная от действующих выработок и отработанных выемочных участков взрывоустойчивыми перемычками, служащая для перемещения метановоздушной смеси от выработанного пространства действующих выемочных участков до поверхности или вентиляционной скважины.

Обще-терминологический словарь

Виртуальный аналог – созданный в компьютере в масштабе 1:1 объект;

Модель – это система, исследование которой служит средством для получения информации о другой системе, упрощённое представление реальных процессов, явлений;

Мультисплит система – от слов мульти (лат. multi-, от multus многих, многочисленный) и сплит (англ. split – «разделять») – система в основе которой лежит разделение от общего к частному;

Порядок (в общем смысле слова) – гармоничное, ожидаемое, предсказуемое состояние или расположение чего-либо;

Процесс – динамическое изменение системы во времени;

Система – совокупность взаимосвязанных элементов, образующих целостность или единство;

Состояние – положение системы относительно других её положений;

Структура – способ взаимодействия элементов системы посредством определённых связей (картина связей и их стабильностей);

Функция – работа элемента в системе.

Явление – проявление сложных физико-химических процессов, происходящих в природе

Методология – учение о методах, способах, путях познания, обучения, воспитания, преобразования действительности, одним словом — о методах организации любой человеческой деятельности

Проект – процесс создания проекта - прототипа, прообраза предполагаемого или возможного объекта, состояния

Список литературы

1. Агрикола, Г. О горном деле и металлургии. В двенадцати книгах. Серия классики науки. Редакция Шухардина С.В. Перевод и примечания Гальминаса, В.А., Дробинского, А.И. / Агрикола Г. – М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1962. – 600 с.
2. Азбель, М.Д., Кобылкин, С.С. Многофункциональные системы безопасности угольных шахт / Азбель М.Д., Кобылкин С.С.// Горная техника 1 (11). – СПб.: изд. «Славутич» – 2013. – С. 52-55.
3. 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; опубл. 14.01.2015, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
4. Андрияшев, М.М. Техника расчета водопровода и водопроводных сетей / М.М. Андрияшев. – М.-Л.: Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1949. – 110 с.
5. Артемьев, В.Б., Метанопылевая опасность рудничной атмосферы Колесниченко И.Е./ Артемьев В.Б., Колесниченко Е.А., Любомищенко, Е.И. // Уголь. – 2017. – № 9 (1098). – С. 26-31.
6. Баловцев, С.В. Обоснование аэрологической безопасности при проектировании угольных шахт / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S4. – С. 11-15.
7. Баловцев, С.В. Разработка метода оценки и управления аэрологическим риском аварий на выемочных участках угольных шахт: дис.... канд. техн. наук: 05.26.02/ Баловцев Сергей Владимирович. – М, 2013 – 149 с.
8. Справочник по борьбе с рудничной пылью / Под ред. Л.И. Барона. Гос. ком. Совета Министров РСФСР. по координации науч.-исслед. работ. Гос. науч.-исслед. ин-т науч. и техн. информации. – М.: – 1962. – 324 с.

9. Безопасность разработки рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом: Сборник документов. Серия 03. Выпуск 33 / Колл. Авт. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 318 с.
10. Блауберг, И.В., Садовский, В.Н., Юдин, Э.Г. Проблемы методологии системных исследований / И.В. Блауберг, В.Н. Садовский, Э.Г. Юдин. – М.: 1970. – С. 7-48.
11. Большой энциклопедический словарь. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. – 1456 с.: ил.
12. Валуев, А.М., Ушаков, В.К. Модель и метод решения задачи оптимального воздухораспределения в шахтной вентиляционной сети / А.М. Валуев, В.К. Ушаков // Обзорные прикладной и промышленной математики. – 2008. – Т. 15. № 3. – С. 454-456.
13. Васенин, И.М., Шрагер, Э.Р., Крайнов, А.Ю., Палеев, Д.Ю., Лукашов О.Ю., Костеренко, В.Н. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н. Костеренко // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3. № 2. – С. 155-163.
14. Воронин, В.Н. Основы рудничной аэрогазодинамики / В.Н. Воронин. – Москва-Ленинград: изд. Углетехиздат, 1951. – С. 300 – 308.
15. Воропаев, А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах / А.Ф. Воропаев. – М.: Недра, 1977. – 359 с.
16. Воропаев, А.Ф. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха в глубоких шахтах. М.: Изд. Недра, 1979 – 192 с.
17. Временная инструкция по расчёту количества воздуха, необходимого для проветривания рудных шахт. Колл. авт. Прасолов П.А., Сатаров В.Н., Дьяков В.В., Евсеев А.В., Кива И.А., Подвысоцкий К.С., Родин В.Е., Рябов В.Ю., Тощев Ю.В., Уткин Н.Т., Шаталов А.Т., Щидловский А.А.,

- Ковалев В.И.. Изд. Министерства цветной металлургии СССР. М.: 1983. – 70 с.
18. Временная инструкция по расчёту количества воздуха, необходимого для проветривания рудных шахт. Составители Прасолов П.А., Сатаров В.Н. М.: 1983. – 70 с.
 19. Временные рекомендации по снижению газообильности выемочных участков шахт Кузбасса поверхностными газоотасывающими вентиляторами, установленными на устьях вентиляционных скважин. Кемерово: Ротапринт ВостНИИ 1988. – 30 с.
 20. Второе начало термодинамики. Сборник работ. Сади Карно, Томсон В., Клаузиус Р., Больцман Л., Смолуховский М. Под редакцией Тимирязева А.К. Изд. ГТТИ, Москва-Ленинград. 1934. – 310 с.
 21. Высоконапорные воздуховоды компании JP Jensen Ventilation AB, Швеция [Офиц. сайт]. URL: <http://www.jensenventilation.com> (дата обращения: 13.07.2016).
 22. Высоконапорные воздуховоды компании Protan Ventiflex, Норвегия, [Офиц. сайт]. URL: www.protan.com (дата обращения: 13.07.2016)
 23. Газизуллин Р.Р., Исаевич А.Г., Левин Л.Ю. Численное моделирование процессов выноса вредных примесей рудничной атмосферы при проветривании тупиковых выработок различными способами // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5, № 2. – С. 127-129.
 24. Гендлер, С.Г. Особенности управления вентиляционным режимом нового Байкальского железнодорожного тоннеля / С.Г. Гендлер, С.В. Синявина // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М: Горная книга. - 2015. - № 11, 2015 г. - С. 173-179.
 25. Гендлер, С.Г. Прогноз и методы борьбы с наледообразованием в транспортных тоннелях, расположенных в суровых климатических условиях / С.Г. Гендлер // Международное бюро по горной теплофизике: Докл. 8-го пленар. заседания, Санкт-Петербург, 14–18 сент. 1998. – СПб., 2000. – С. 30–36.

26. Гендлер, С.Г. Тепловой режим подземных сооружений / С.Г. Гендлер. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1987. – 102 с.
27. Гендлер, С.Г. Управление качеством воздуха при эксплуатации подземных сооружений транспортного назначения / С.Г. Гендлер // Горный информ.- аналит. бюл. – 2000. – № 7. – С. 99–105.
28. Гендлер, С.Г. Управление тепловым режимом железнодорожных тоннелей, расположенных в суровых климатических условиях / С.Г. Гендлер, С.В. Синявина // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М: Горная книга, - 2015. - «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». - Специальный выпуск №7. – С. 32-38.
29. Гендлер, С.Г. Управление тепловым режимом транспортных тоннелей в условиях сурового климата / С.Г. Гендлер, С.В. Синявина. // Тезисы докладов II Международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». – СПб. – 2014. – С. 23-24.
30. Гендлер, С.Г., Савенков Е.А. Использование струйных вентиляторов для проветривания железнодорожных тоннелей // Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №7. Москва, 2015. с. 26-31.
31. Гендлер, С.Г., Савенков, Е.А. Методика выбора параметров струйных вентиляторов для проветривания транспортных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень №4. Специальный выпуск №17. Москва, 2015, С. 9-15.
32. Гендлер, С.Г., Савенков, Е.А. Особенности обеспечения аэродинамической безопасности при сооружении и эксплуатации подземных сооружений транспортного назначения // Горный информационно-аналитический бюллетень №4. Специальный выпуск №17. Москва. - 2015, С. 3-9.

33. Гендлер, С.Г., Савенков, Е.А. Физическое моделирование продольной схемы проветривания тоннелей с помощью вентиляторов-эжекторов, установленных на поверхности перед порталом // Горный информационно-аналитический бюллетень №4. Специальный выпуск №17. М., 2015, С. 15-22.
34. Гипроуголь – Вентиляция шахт [Официальный сайт]. URL: <http://www.giprougol.ru> (дата обращения: 13.07.2016).
35. Говорухин, Ю.М., Домрачев А.Н., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю., Балаганский М.Ю. Методология моделирования фильтрации газовоздушных смесей в выработанном пространстве выемочного участка. Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2011. № 1-2011. С. 72-76.
36. ГОСТ 2.850-75 – ГОСТ 2.857-75 Горная графическая документация (Виды и комплектность, Общие правила выполнения горных чертежей, Изображение элементов горных объектов, Правила выполнения условных обозначений, Обозначения условные ситуации земной поверхности, Обозначения условные горных выработок, Обозначения условные производственно-технических объектов, Обозначения условные полезных ископаемых, горных пород и условий их залегания), М.: Издательство стандартов – 1983, 200 с.
37. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов РФ, Министерства природных ресурсов Российской Федерации, изд. Минерал. – М.: 2007, 2008, 2010, 2011, 2012
38. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов РФ в 2011 году», Министерства природных ресурсов Российской Федерации, Минерал. – М.: 2011
39. Гришин, Е.Л., Зайцев, А.В. Классификация тепловых источников по степени влияния на надежность воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях // Научные исследования и инновации – 2011. – Т. 5, № 1. – С. 156-158.

40. Грязев, М.В., Качурин, Н.М., Воробьев, С.А. Математические модели аэрогазодинамических и теплофизических процессов при подземной добыче угля на различных стадиях отработки месторождений. Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 99-108.
41. Дополнение к «Руководству по проектированию вентиляции угольных шахт». М.: Изд. Недра, 1981.
42. Дремов, В.И. Обоснование и выбор комплекса противопылевых мероприятий в угольных шахтах для снижения риска заболевания шахтеров пневмокониозом: дис.... докт. техн. наук: 05.26.02/ Дремов Виктор Иванович. – М, 2000. – 319 с.
43. Дремов, В.И., Кирин, Б.Ф., Ерохин, С.Ю. Управление пылединамическими процессами в шахтах с использованием вентиляции и гидроэжекционных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1992. № 1. С. 19.
44. Дубинский, С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы: дис.... канд. техн. наук: 05.13.18/ Дубинский Сергей Иванович. – М., 2010. – 198 с.
45. Дядькин, Ю.Д. Зильберборд, А.Ф., Чабан, П.Д. Тепловой режим рудных, угольных и россыпных шахт Севера. М.: Изд. «Наука». – 1968. – 172 с.
46. Дядькин, Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера / Ю.Д. Дядькин. – М.: Недра, 1968. – 256 с.
47. Дядькин, Ю.Д. Тепловой режим рудных, угольных и россыпных шахт Севера / Ю.Д. Дядькин, А.Ф. Зильберборд, П.Д. Чабан. – М.: Наука, 1968. – 172 с.
48. Егоров, В., Кобылкин, С.С., Мещеряков Д.А., и др. Погрешность приборов и разработчиков – о плюсах-минусах средств измерения для проведения воздушно-депресссионных съемок. Уголь Кузбасса № 4 (023). июль - август 2012 г., Кемерово: изд. «ИД «Кузнецкий край», С. 106-107.

49. Зайцев, А.В. Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких: дис.... канд. техн. наук: 25.00.20/ Зайцев Артём Вячеславович. – Пермь, 2013. – 170 с.
50. Иванников, А.Л. Математическое моделирование шахтных вентиляционных сетей, содержащих выработки с неустойчивым проветриванием: дис.... канд. техн. наук: 05.13.18/ Иванников Александр Любимович. – М., 2015. – 120 с.
51. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». 2014. – 250 с.
52. Инструкция по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания действующих угольных шахт. М.: Недра, 1975. – 80 с.
53. Казаков, Б.П., Зайцев, А.В., Гришин, Е.Л. Оптимизация теплогазодинамических расчетов топологически сложных вентиляционных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2011. – № 4. – С. 191-194.
54. Казаков, Б.П., Левин, Л.Ю. Оптимизация технологических режимов подготовки вентиляционного воздуха для шахт и рудников // Научно-педагогическое наследие профессора И.И. Медведева: Сб. науч. докл. Санкт-Петербург, – 1999. – С. 169-174.
55. Казаков, Б.П., Левин, Л.Ю. Энергосбережение в системах обогрева шахтных воздухоподающих стволов // «Энергосбережение, экология и безопасность»: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Тула: ТулГУ, – 1999. – С. 28-29.
56. Казаков, Б.П., Шалимов, А.В. Численные методы моделирования режимов аварийного проветривания рудников // Горный журнал. – 2013. – № 12. – С. 93-95.
57. Казаков, Б.П., Шалимов, А.В., Зайцев, А.В. Влияние закладочных работ на формирование теплового режима в горных выработках в условиях рудников ОАО «Норильский никель» // Вестник Пермского

- национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 2. – С. 110-114.
58. Казаков, Б.П., Шалимов, А.В., Зайцев, А.В. Нестационарный сопряженный теплообмен между рудничным воздухом и горным массивом в условиях глубоких рудников // Известия высших учебных заведений. Горный журнал – 2013. – № 1. – С. 26-32.
59. Казанин, О.И., Сидоренко, А.А., Тюрнин, В.А. Обоснование пространственно-планировочных решений при отработке свит пологих пластов, склонных к самовозгоранию. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 4. – С. 23-27.
60. Казанин, О.И., Сидоренко, А.А., Тюрнин, В.А. Оценка влияния горнотехнических факторов на эндогенную пожароопасность при отработке сближенных угольных пластов. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 4. – С. 22-27.
61. Каледина, Н.О. Современные проблемы вентиляции угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S1. С. 141-149.
62. Каледина, Н.О., Кобылкин, А.С., Кобылкин, С.С. Моделирование пульсирующего проветривания горных выработок. Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ) – М.: Изд. «Горная книга» – 2011. – № 7. тем. пр. «Метан. Аэрология. Безопасность» – С. 449-453.
63. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Анализ способов проветривания газообильных угольных шахт Сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование 28-29 октября 2015 г. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2015. – 201 с.

64. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Моделирование процессов вентиляции шахт для обеспечения метанобезопасности горных работ. Горный журнал. М.: Изд. «Руда и металлы» – 7.2011. – С. 101-103.
65. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. О выборе способа проветривания тупиковых горных выработок газообильных угольных шахт. Горный журнал. М.: Изд. «Руда и металлы» - 12.2014 г., С. 99-103.
66. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Обоснование метанобезопасных режимов проветривания очистных и подготовительных выработок. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Сборник научных трудов. Выпуск 1 «Аэрология и безопасность горных предприятий» / Сост. Галкин А.Ф. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. – С. 54-59.
67. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Объёмное моделирование аэрогазодинамических процессов как основа расчетов вентиляции шахт Учреждение Российской академии наук Всероссийский институт научной и технической информации РАН (ВИНИТИ РАН) – М.: ВИНТИ РАН, – 2011. Деп. в ВИНТИ №181-В2011, 2011. – 15 с.
68. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Объемное моделирование, как метод исследования и управления термо- и аэрогазодинамическими процессами на горных предприятиях Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка – 2013» – М.: Изд. «Горная книга» – 2013. – С. 149-156.
69. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Объемное моделирование, как метод исследования и управления термо- и аэрогазодинамическими процессами на горных предприятиях Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка – 2013» – М.: Изд. «Горная книга» – 2013. – С. 149-156.
70. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Основы системного проектирования вентиляции шахт Сборник научных трудов. Выпуск 2 «Пути повышения эффективного освоения пластовых месторождений полезных ископаемых

- подземным способом» / Сост. А.В. Фомин. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», – 416 с.: ил., табл. – (Библиотека горного инженера). 2014. – С. 184-188.
71. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Расчёт аэродинамических параметров выработанных пространств Методические указания по проведению практических и самостоятельных занятий студентов специальности «Горное дело». – М.: Издательство «Горная книга», 2015. – 44 с.
 72. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Системное проектирование вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических систем. Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка – 2012» – М.: Изд. «Горная книга» – 2012. – С. 282-294.
 73. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С., Каледни, О.С., Кобылкин, А.С. Учебное пособие Проектирование вентиляции при строительстве подземных сооружений, М.: Издательство «Горная книга», 2016. – 78 с.: ил.
 74. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С., Мещеряков, Д.А., Гашенко, О.И. Сравнительная оценка приборов, используемых для проведения депрессионных съемок. Безопасность труда в промышленности М.: – 2012. – № 3 – С. 50-52.
 75. Каледина, Н.О., Малашкина, В.А., Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С., Завиркина, Т.В. Трёхмерная система контроля аэрогазодинамических параметров рудничной атмосферы. Патент на полезную модель регистрационный № 129992, зарегистрирован 10 июля 2013. – 1 с.
 76. Качурин, Н.М., Воробьев, С.А., Левин, А.Д., Васильев, П.В. Моделирование режимов работы систем вентиляции подготовительных выработок. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 1. – С. 156-166.
 77. Качурин, Н.М., Левин, А.Д., Ботов, Ф.М. Аэрогазодинамические процессы при строительстве тоннелей большого поперечного сечения.

- Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 1. – С. 46-55.
78. Качурин, Н.М., Левин, А.Д., Ефимов, В.И., Воробьёв, С.А. Моделирование движения воздуха в рудниках. Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 11. – С. 56-60.
 79. Кирин, Б.Ф. Теоретические и экспериментальные исследования физико-химических методов борьбы с пылью в шахтах: дис.... докт. техн. наук: 05.26.03/ Кирин Борис Филиппович. – М., 1973 – 242 с. приложение 122 с.
 80. Кирин, Б.Ф. Рудничная аэрология. Методические указания. Ротапринт МГИ. М.: – 1971. – 88 с.
 81. Кирин, Б.Ф., Ушаков, К.З. Рудничная и промышленная аэрология. Учебник для вузов. М.: – Издательство «Недра». – 1983. – 256 с.
 82. Кобылкин, А.С. Распределение пыли различного дисперсного состава в горных выработках, в зависимости от расположения источника пылевыведения. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. – № 6. – С. 291-302.
 83. Кобылкин, А.С. Распределение пыли различного дисперсионного состава в горных выработках Материалы 12 Международной научной школы молодых учёных и специалистов. «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых учёных и специалистов» 23-27 ноября 2015 г. – М.: ИПКОН РАН, 2015 – С. 376-381.
 84. Кобылкин, А.С. Обоснование параметров систем вентиляции горных выработок при их проходке с использованием пульсирующего режима проветривания: дис.... канд. техн. наук: 05.26.03/ Кобылкин Александр Сергеевич. – М., 2012. – 100 с.
 85. Кобылкин, А.С., Кобылкин, С.С. Газовыведение из выработанного пространства в горные выработки выемочного участка. Сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование 28-29 октября 2015 г. –

- СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2015. – С. 90.
86. Кобылкин, А.С., Кобылкин, С.С. Зависимость скорости движения воздуха в примыкающей тупиковой горной выработке от расположения генератора импульсов давления по сечению в сквозной выработке. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 12. – С. 225-229.
87. Кобылкин, А.С. Отложение угольной пыли в горных выработках. В сборнике: Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках Материалы XXVII Международной научной школы. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; Институт проблем комплексного освоения недр РАН. – 2017. – С. 122-124.
88. Кобылкин, А.С., Кобылкин, С.С. Исследование движения воздуха через неоднородную пористую среду. Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). № 8 – М.: Изд. «Горная книга» – 2015. – С. 224-227.
89. Кобылкин, А.С., Кобылкин, С.С. Перспективы разработки технологий пульсирующей вентиляции при ведении горных предприятий. Горная техника 2 (12) СПб.: изд. "Славутич" – 2013 – С. 14-16.
90. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Расчёт необходимого количества воздуха для шахт и рудников по наибольшему количеству людей. Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – М.: Изд. «Горная книга» – 2014. – № 5 – С. 209-217.
91. Кобылкин, С.С. Влияние перепадов давления при проветривании на состояние здоровья работающего персонала. Безопасность труда в промышленности. – М.: Издательство ЗАО НТЦ ПБ – 2015. – С. 49-52.
92. Кобылкин, С.С. Инновационное решение в проектировании вентиляции угольных шахт и рудников. Горная техника 2 (10) СПб.: изд. "Славутич" 2012. – С. 20-23.

93. Кобылкин, С.С. Моделирование аэрогазодинамических процессов вентиляции шахт и рудников при проектировании Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр/Материалы XI международной конференции, Москва (Россия) – Усть-Каменогорск (Казахстан), 17-21 сентября 2012 г., М.: РУДН. – 2012. – С. 266-268.
94. Кобылкин, С.С. Обоснование метода расчёта параметров вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических процессов: дис.... канд. техн. наук: 05.26.03/ Кобылкин Сергей Сергеевич. – М., 2011. – 161 с.
95. Кобылкин, С.С. Определение взрывопожаробезопасных режимов проветривания шахт/ Кобылкин С.С. // Монография. М.: изд. «Горная книга». – 2017. – С. 44 с.
96. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С., Мещеряков, Д.А. Новый способ расчета параметров ударно-воздушных волн в шахтах Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S12. – С. 22-26.
97. Кобылкин, С.С. Основные принципы системного проектирования вентиляции шахт и рудников / Кобылкин С.С. // Сборник тезисов докладов V Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий» 15-16 мая 2014г. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2014. – С. 29-30.
98. Кобылкин, С.С. Применение кинетической теории газов при описании процессов проветривания горных предприятий / Кобылкин С.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – 2017 г., № 12, S42. – 12 с.
99. Кобылкин, С.С. Системное проектирование вентиляции горных предприятий / Кобылкин С.С. // Горный информационно-аналитический

- бюллетень (ГИАБ). Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка – 2015» – М.: Изд. «Горная книга» – 2015 г. С. 150-157.
100. Кобылкин, С.С. Системное проектирование вентиляции как основа безопасности ведения горных работ в современных условиях / Кобылкин С.С. // Сборник тезисов докладов Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» под редакцией академика К.Н. Трубецкого // Составители: к.т.н. А.Г. Красавин, д.т.н. И.В. Милетенко. – М.: ИПКОН РАН. – 2014. – С. 356-358.
 101. Кобылкин, С.С. Тактические расчёты по горноспасательному делу / Кобылкин С.С. // Учебно-методическое пособие по Технологии горноспасательного дела. Предназначено для самостоятельной работы, курсового и дипломного проектирования. «Горное дело». – М.: Издательство «Горная книга», 2016. – 108 с.: ил.
 102. Кобылкин, С.С. Требования к системному проектированию вентиляции шахт и рудников / Кобылкин С.С. // Научно-технический и методический журнал Рациональное освоение недр – М.: – 2013. – № 2. – С .56-59.
 103. Кобылкин, С.С. Физико-химические особенности при проветривании строящихся стволов в условиях Крайнего Севера / Кобылкин С.С. // Сборник тезисов докладов II Международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» 30-31 октября 2014. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2014. – С. 29-30.
 104. Кобылкин, С.С., Каледин, О.С., Кобылкин, А.С. Опыт применения вентиляционных устройств AirMover при строительстве стволов / С.С. Кобылкин, О.С. Каледин, А.С. Кобылкин // Материалы 12 Международной научной школы молодых учёных и специалистов. «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых учёных и

- специалистов» 23-27 ноября 2015 г. – М.: ИПКОН РАН, 2015 – С. 370-373.
105. Кобылкин, С.С., Каледин, О.С., Кобылкин, А.С., Дядин, С.А. Оценка влияния местных сопротивлений на общее аэродинамическое сопротивление воздухопроводов / С.С. Кобылкин, О.С. Каледин, А.С. Кобылкин, С.А. Дядин // Сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование 28-29 октября 2015 г. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». -2015. – С. 91-92.
106. Кобылкин, С.С., Каледин, О.С., Степанов, А.В., Степанова, И.С. Проблема правильного расчёта количества воздуха, необходимого для разбавления газов, образующихся после проведения взрывных работ Сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование 28-29 октября 2015 г. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». -2015. – 87 с.
107. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. 3-D моделирование физических процессов при авариях на горных предприятиях Сборник тезисов докладов VIII Международной горноспасательной Конференции IMRB-2017 – М.: МЧС. – 2017. – 34 с.
108. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Влияние естественной тяги на безопасность ведения горных работ Сборник тезисов докладов 2-й Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого, Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр – М.: ИПКОН РАН. – 2016. – 494 с.
109. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Вопросы нормирования и измерения теплового режима шахт и рудников (статья) Международная молодежная научная школа «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». Том 2. 19-23 ноября 2012 г. – М.: ИПКОН РАН, 2012 – С. 478-480.

110. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Обзор программного обеспечения в области проектирования вентиляции шахт и рудников с точки зрения эндогенной пожароопасности. В сборнике: Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых Материалы 13-ой Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – 2016. – С. 241-243.
111. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Проблемы проветривания глубоких стволов при ведении взрывных работ Материалы 11 Международной научной школы молодых учёных и специалистов. «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых учёных и специалистов» 24-28 ноября 2014 г. – М.: ИПКОН РАН, 2014 – С. 368-371.
112. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Способ обнаружения эндогенных пожаров на основе компьютерного моделирования Сборник тезисов докладов 2-й Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого, Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр – М.: ИПКОН РАН. – 2016. – 494 с.
113. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Учёт естественной тяги при системном проектировании вентиляции шахт Сборник научных трудов. Выпуск 2 «Пути повышения эффективного освоения пластовых месторождений полезных ископаемых подземным способом» / Сост. А.В. Фомин. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2014. – 416 с.: ил., табл. – (Библиотека горного инженера». 2014. – С. 188-191.
114. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С., Каледин, О.С., Степанов, А.В. Новый подход при проектировании вентиляции. Горная техника 1 (15) СПб.: Изд. "Славутич" – 2015 – С. 12-14.
115. Кобылкин, С.С., Михеев, А.Е., Удалов, Р.А., Кобылкин, А.С. Расчёт количества воздуха для проходческих забоев с учётом динамики работы машин в горных выработках. Горная техника 2 (14) СПб.: изд. "Славутич" – 2014 – С. 52-55.

116. Кобылкин, С.С., Михеев, А.Е., Удалов, Р.А., Кобылкин А.С., Липатов М.В. Способ обогрева воздуха, поступающего в шахту «Эстония» Горная техника 1 (13) СПб.: Изд. "Славутич" – 2014. – С. 20-23.
117. Кобылкин, С.С., Проценко, А.В. Анализ состояния и проблем проветривания на руднике Нурказган (ТОО «Корпорация Казахмыс», Казахстан» Материалы 11 Международной научной школы молодых учёных и специалистов. «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых учёных и специалистов» 24-28 ноября 2014 г. – М.: ИПКОН РАН, 2014 – С. 365-368.
118. Кобылкин, С.С., Сологуб, О.В. Обзор существующих средств программного обеспечения для моделирования вентиляции подземных сооружений и шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ) – М.: Изд. «Горная книга» – 2009 г., Тем. пр. «Аэрология», – С. 115-132.
119. Колесниченко, Е.А., Артемьев, В.Б., Колесниченко, И.Е., Любомищенко, Е.И. Концепция проектирования системы вентиляции, обеспечивающей снижение риска взрывов метана и угольной пыли в забоях тупиковых выработок Уголь. 2013. № 2 (1043). – С. 37-41.
120. Колесниченко, Е.А., Артемьев, В.Б., Колесниченко, И.Е., Черечукин, В.Г. Обоснование всасывающего способа вентиляции метанопылеобильных забоев тупиковых выработок Уголь. 2014. – № 6. – С. 52-57.
121. Колесниченко, Е.А., Колесниченко, И.Е., Артемьев В.Б. Обоснование методики расчёта режима вентиляции метанообильных забоев подготовительных выработок Горная промышленность. 2009. – № 5 (87). – С. 46-50.
122. Колесниченко Е.А., Колесниченко И.Е. Анализ причин и возможные методы предотвращения взрывов метана и пожаров в шахтах России Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. – № 8. – С. 130-137.

123. Колесниченко, И.Е. Аэродинамическое обеспечение метанобезопасных режимов вентиляции высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт: дис... докт. техн. наук: 05.26.03 / Колесниченко Игорь Евгеньевич. – М., 2005 – 248 с.
124. Колесниченко, И.Е. Основы интенсивной и безопасной разработки метаноносных пластов угля Горная промышленность. –2003. –№ 3. – С. 7.
125. Колесниченко, И.Е. Технология интенсивной и безопасной выемки метаноносных пластов угля Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 9. – С. 233-237.
126. Колесниченко, И.Е., Артемьев, В.Б., Колесниченко, Е.А., Черечукин, В.Г., Любомищенко Е.И. Предотвращение взрывов угольной пыли и метана в горных выработках: теория и практика Горная промышленность. –2017. – № 4 (134). – С. 26.
127. Комаров, В.Б., Килькеев Ш.Х. Рудничная вентиляция. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: – Издательство «Недра». – 1969. – 416 с.
128. Кормщиков, Д.С. Исследование и разработка систем аэрогазодинамической безопасности подземных рудников: дис.... канд. техн. наук: 25.00.20/Кормщиков Денис Сергеевич. – Пермь, 2015. – 120 с.
129. Красноштейн, А.Е. Математическое моделирование процессов теплообмена рудничного воздуха с массивом горных пород при пожаре / Красноштейн, А.Е., Казаков Б.П., Шалимов А.В. / ФТПРПИ, №3. – 2006. – С. 94-102.
130. Красноштейн, А.Е., Файнбург, Г.З. Диффузионно-сетевые методы расчёта проветривания шахт и рудников. Екатеринбург, изд. ГИ УрО РАН –1992. – 243 с.
131. Круглов, Ю.В. Разработка проекта технического перевооружения вентиляционной сети рубника БКПРУ-4 ОАО «Уралкалий» с системой автоматического оптимального управления проветриванием и регулируемой рециркуляцией // Стратегия и процессы освоения

- георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 260-262.
132. Ксенофонтова, А.И. Депрессионные съёмки на шахте. Москва-Ленинград. – Изд. ОНТИ НКТП СССР, – 1938. – 74 с.
 133. Ксенофонтова, А.И., Карпухин, В.Д., Харёв, А.А. Аэродинамическое сопротивление горных выработок и шахт в целом. – М.: 1950. – 268 с.
 134. Кудряшев, В.В. Вопросы методологии оценки взрывобезопасного отложения пыли в выработках современных угольных шахт / Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 12. – С. 39-42.
 135. Кудряшев, В.В. Проблема пылевой опасности при супердинамической технологии угледобычи / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 4. – С. 77-78.
 136. Курилко, А.С. Математическая модель для расчета количества циклов замораживания – оттаивания горных пород в выработках криолитозоны / А.С. Курилко, Ю.А. Хохолов, Д.Е. Соловьев // Горный информ.-аналит. бюл. Тематич. прил. «Физика горных пород». – 2006. – С. 211–220.
 137. Курилко, А.С. Натурные исследования температурного режима горных выработок и вмещающего массива рудника «Айхал» / А.С. Курилко, С.П. Шкулев, В.В. Киселев и др. // Горный информ.-аналит. бюл. Тематич. прил. «Аэрология». – 2005. – С. 90–100.
 138. Курилко А.С. Прогноз температуры в подземном сооружении в условиях прогрессирующего накопления влаги в слое теплозащитного покрытия / А.С. Курилко, В.В. Киселев, Ю.А. Хохолов // I Евразийский симпозиум по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Якутск, 16–20 июля 2002. – Якутск, 2002. – Ч. 4. – С. 112–116.
 139. Лазарев, Н.В. Основы промышленной токсикологии. – Москва-Ленинград: Государственное издательство медицинской литературы ленинградское отделение, – 1938. – 388 с.
 140. Лебедев, В.С., Скопинцева, О.В. Остаточные углеводороды угольной пыли как фактор повышения пожаровзрывоопасности в угольных

- шахтах. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2016. – № 2. – С. 68-73.
141. Левин, Л.Ю. Влияние работы систем воздухоподготовки на процессы охлаждения крепи и закрепного пространства при реверсировании ГВУ // Стратегия и процессы освоения георесурсов: матер. ежегодн. научн. сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2008 г. – Пермь, – 2009. – С.45-49.
 142. Левин, Л.Ю. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов / Л.Ю. Левин, А.Г. Исаевич, М.А. Сёмин, Р.Р. Газизуллин // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 72-75.
 143. Левин, Л.Ю. Исследование и разработка энергосберегающих систем воздухоподготовки рудников: дис.... канд. техн. наук: 25.00.20/Левин Лев Юрьевич. – Пермь, 2004. – 143 с.
 144. Левин, Л.Ю. Моделирование и расчет систем обогрева шахтных воздухоподающих стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 10. – С.49-54.
 145. Левин, Л.Ю. Общие принципы работы безвентиляторных систем отопления шахтных стволов // Проблемы безопасности и совершенствования горных работ: Тез. докл. междунар. конф. Пермь: – 1999. – С. 142-144.
 146. Левин, Л.Ю. Особенности обогрева воздухоподающих стволов и основы энергосбережения при их реконструкции // Проблемы безопасности и совершенствования горных работ: Тез. докл. междунар. конф. Пермь. – 1999. – С. 144-147.
 147. Левин, Л.Ю. Особенности обогрева воздухоподающих стволов и основы энергосбережения при их реконструкции // Проблемы горного недроведения и системологии: Материалы науч. сес. Горного института УрО РАН. Пермь, 1999. – С.124-126.

148. Левин, Л.Ю. Осушение воздуха в теплообменных аппаратах и его влияние на выпадение влаги в шахтных стволах и околоствольных выработках калийных рудников // Проблемы комплексного мониторинга на месторождениях полезных ископаемых: Сб. докл. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2002. – С. 150-152.
149. Левин, Л.Ю. Разработка шахтной подземной установки кондиционирования воздуха для условий глубокого рудника «Таймырский» // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 252-255.
150. Левин, Л.Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки : дис.... докт. техн. наук: 25.00.20/ Левин Лев Юрьевич. – Пермь, 2010. – 275 с.
151. Левин, Л.Ю. Тепловые утечки в системах обогрева воздухоподающих стволов // Материалы науч. сес. Горного института УрО РАН по результатам НИР в 1999 году, Пермь, 2000. – С. 18-21.
152. 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 – М.: КомпьютерПресс, 2011 – № 10, – С. 64-66.
153. Левин, Л.Ю., Исаевич, А.Г. Тепломассообмен в энергосберегающих системах обогрева шахтных стволов рудников // Известия вузов. Горный журнал. – 2004. – № 5. – С.40-44.
154. Левин, Л.Ю., Исаевич, А.И., Сёмин, М.А., Газизуллин, Р.Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горный журнал/ – 2015 –№ 1. – С. 72-75.
155. Левин, Л.Ю., Казаков, Б.П. Использование газовых теплогенераторов в системах обогрева воздухоподающих стволов калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень,– 2008. – № 10. – С. 55-59.

156. Левин, Л.Ю., Сёмин, М.А., Газизуллин, Р.Р. Разработка метода расчета местных аэродинамических сопротивлений при решении сетевых задач воздухораспределения // Горный информационно-аналитический бюллетень, Изд. «Горная книга». – 2014. – № 9. – С. 200-206.
157. Левин, Л.Ю., Сёмин, М.А., Зайцев, А.В. Определение перепада давления на сопряжении вентиляционного ствола и канала ГВУ // Горный информационно-аналитический бюллетень, Изд. «Горная книга». – 2015. – № S7. – С. 93-02.
158. Левин, Л.Ю., Сёмин, М.А., Зайцев, А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых – 2014. – № 2. – С. 154-161.
159. Ломоносов, М.В. Первые основанія металлургіи или рудныхъ делъ. Прибавления 1. О движеніи воздуха въ рудникахъ. Печатны при Императорской Академіи Наук. СПб.: – 1763. – С. 223-236.
160. Луговской, С.И., Шкута, Э.И., Ошмянский, И.Б., Немченко А.А. Совершенствование разработки и вентиляции рудников. Изд-во «Недра», 1968. –302 с.
161. Любомищенко, Е.И. Разработка научно-обоснованной методики проектирования схем вентиляции тупиковых комбайновых забоев выработок, проходимых в условиях повышенной газообильности: автореф. дис.... канд. техн. наук: 25.00.21/Любомищенко Екатерина Игоревна. – Новочеркасск, 2013. – 22 с.
162. Методика оценки радиационной обстановки на угольных шахтах и разрезах. РД 8-016-91. М.: – 1992. –116 с.
163. Методические указания по выбору схем проветривания выемочных участков с высокой газообильностью / Колл. Авт. Бобров А.И., Касимов О.И., Кузьмин Д.В., Балинский Б.В., Попов И.Н., Погребной А.Я., Павлов А.Ф. Изд. МакНИИ, Макеевка-Донбасс – 1976. – 24 с.

164. Молчанов, П.А. Аэрология. Ленинград-Москва. Изд. Гидрометеорологическое – 1938. – 408 с.
165. Назаренко, В.И. Программная система РЕВОД для расчета воздухо- и газораспределения в шахтной вентиляционной сети. – Донецк: Известия Донецкого горного института, 1999. – С. 21-24.
166. Назаренко, В.И. Расчёт газораспределения в шахтной вентиляционной сети. Сб. Сборник научных трудов Национальной горной академии Украины N5. Проблемы аэрологии горнодобывающих предприятий. Днепропетровск: РИК НГА Украины, 1999, – С. 46-51.
167. Норина, Н.В. Проведение научных исследований и разработка нейтрализатора ядовитых газов при проведении горных работ по сильвинитовому пласту АБ комбайновыми комплексами. Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 287-289.
168. Нормативные требования по применению способов и схем проветривания угольных шахт. Серия 05. Выпуск 41. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 12 с.
169. Официальный сайт компании Schauenburg Tunnel-Ventilation GmbH <http://tunnel-ventilation.de/ru/produkte/spirallutten/unterdruck-2/> (дата обращения 08.10.2017)
170. Официальный сайт ОАО «Воркутауголь» URL: <http://www.vorkutaugol.ru/rus/about/structure> (дата обращения 08.10.2017)
171. Официальный сайт ОАО «Сибирская угольная энергетическая компания» URL: <http://www.suek.ru> (раздел: добыча → регион) (дата обращения 08.10.2017)
172. Официальный сайт ООО «Научно-производственное объединение «АэроСфера», URL: <http://npo-aerosfera.ru/production/vspomog> (дата обращения 08.10.2017)

173. Официальный сайт управляющей компании «Промышленно-металлургический холдинг» URL: <http://www.metholding.ru/ru/factory/sibres> (дата обращения 08.10.2017)
174. Палеев, Д.Ю. Сетевая задача проветривания горных выработок и выработанного пространства шахты. Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 5. – С. 58-62.
175. Палеев, Д.Ю., Аксенов, В.В., Лукашов, О.Ю., Васенин, И.М., Крайнов, А.Ю., Шрагер, Э.Р. Моделирование аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях современных горнодобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S7. – С. 224-230.
176. Палеев, Д.Ю., Балаганский, М.Ю., Кнышенко, А.Н. О численном методе решения стационарной задачи проветривания горных выработок и выработанного пространства шахты // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2010. – № 1-2010. – С. 31-34.
177. Палеев, Д.Ю., Лукашов, О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках // Горная промышленность. – 2007. – № 6 (76). – С. 20-23.
178. Палеев, Д.Ю., Лукашов, О.Ю., Васенин, И.М., Шрагер, Э.Р., Крайнов, А.Ю., Костеренко, В.Н. Моделирование распространения ударных волн от взрыва и горения газопылевой смеси в угольных шахтах // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – № 3. – С. 371-377.
179. Палеев, Д.Ю., Руденко, Ю.Ф., Костеренко, В.Н. Состояние и перспективы внедрения компьютерных программ обеспечения безопасности на угольных шахтах России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 12. – С. 164-169.
180. Поздняков, Г.А. Научные основы, методы и технические средства нормализации атмосферы подготовительных забоев угольных шахт по

пылевому фактору: автореф. дис... докт. техн. наук: / Поздняков Георгий Акимович. – М., 1997. – 39 с.

181. Поздняков, Г.А. Голоскоков, С.И., Голоскоков, Е.И., Закутский, Е.Л. Проблемы и перспективы развития систем мониторинга взрывобезопасности горных выработок // Горная промышленность. – 2016. – № 4 (128). – 66 с.
182. Положение об аэрогазовом контроле в угольных шахтах. Серия 05. Выпуск 13 / Колл. авт. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». 2016. – 72 с.
183. Порцевский, А.В. Вентиляция шахт. Аэрология карьеров (Аэрология горных предприятий). Учебное пособие. – М.: изд. МГОУ, 2004. – 71 с.
184. Правила при строительстве подземных сооружений (ПБ 03-428-02). Серия 03. Выпуск 12 / Колл. Авт. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 410 с.
185. Приказ МЧС России от 09.06.2017 № 251 «Об утверждении Устава военизированной горноспасательной части по организации и ведению горноспасательных работ» http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_223484/ (дата обращения 25.09.2017)
186. Приказ Ростехнадзора от 01.12.2011 № 680 (ред. от 08.08.2017) «Об утверждении Инструкции по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок» [оф. сайт Консультант плюс] (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2011 № 22815) http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125667/
187. Приказ Ростехнадзора от 06.11.2012 № 636 (ред. от 08.08.2017) "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по разгазированию горных выработок,

- расследованию, учету и предупреждению загазований» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2012 № 26463) [оф. сайт Консультант плюс]
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_141723/ (дата обращения 15.06.2017)
188. Приказ Ростехнадзора от 06.11.2012 № 638 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по проведению плановой практической проверки аварийных вентиляционных режимов, предусмотренных планом ликвидации аварий» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2012 № 26461) [оф. сайт Консультант плюс]
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_141218/ (дата обращения 15.06.2017)
189. Приказ Ростехнадзора от 16.12.2015 № 517 (ред. от 31.10.2016) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Инструкция по предупреждению эндогенных пожаров и безопасному ведению горных работ на склонных к самовозгоранию пластах угля» [оф. сайт Консультант плюс] (Зарегистрировано в Минюсте России 18.01.2016 № 40602)
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_192714/ (дата обращения 15.06.2017)
190. Программное обеспечение для расчёта вентиляции шахт [Офиц. сайт]. URL: <http://www.a-mine.com> (дата обращения 13.07.2016)
191. Программное обеспечение для угледобывающих предприятий и ВГСЧ [Офиц. сайт]. URL: <https://minesoft.ru> (дата обращения 13.07.2016)
192. Протодяконов, М.М. Проветривание рудников: Учебник для вузов. — Москва-Ленинград: Государственное научно-техническое издательство. — 5-е изд. перераб. и доп., 1931. — 199 с.

193. Пучков, Л.А. Аэрогазодинамические основы оперативного управления вентиляцией высокопроизводительных угольных шахт: дис... докт. техн. наук: /Пучков Лев Александрович. – М., 1973. – 386 с.
194. Пучков, Л.А. Аэродинамика подземных выработанных пространств. – М.: Московский государственный горный университет. –1993. – 267 с.
195. Пучков, Л.А. Метод расчёта распределения воздуха в системе горные выработки – выработанное пространство. Сб. «Научные основы создания высокопроизводительных комплексно-механизированных и автоматизированных шахт в вычислительно-логическом управлении». МГИ, вып. IV, ч. 11. 1971 – С. 34-37.
196. Пучков, Л.А., Каледина, Н.О. Кобылкин, С.С. Глобальное энергетическое потребление: прогнозы и реальность // Горный журнал. М.: Изд. «Руда и металлы» – 2016. – №1. – С. 4-6.
197. Пучков, Л.А., Режим движения воздуха в выработанном пространстве/ Пучков Л.А. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 1965. –№ 10. –С. 64
198. Пучков, Л.А., Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Методология системного проектирования вентиляции шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка – 2014» – М.: Изд. «Горная книга» – 2014. – С. 128-137.
199. Пучков, Л.А., Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Аэродинамический метод предупреждения эндогенной пожароопасности выработанных пространств угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – 2012. – № 12. – С. 307-311.
200. Пучков, Л.А., Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Системные решения обеспечения метанобезопасности угольных шахт // Горный журнал. – 2014. – №5. – С. 12-16.

201. Пучков, Л.А., Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С., и др. Локальное формирование параметров вентиляции, подлежащих контролю при автоматизации проветривания // Уголь. – 2015. – № 11. С. 58-61.
202. Пылеулавливающие установки компании Compact Filter Technic CFT, Германия, [Офиц. сайт]. URL: www.cft-gmbh.de (дата обращения: 13.07.2016)
203. Романченко, С.Б. Пылевая динамика в угольных шахтах / С. Б. Романченко, Ю. Ф. Руденко, В. Н. Костеренко. – М.: Горное дело, 2011. – 255 с.
204. Российская угольная энциклопедия. В 3 томах. Ред. Е. Я. Диколенко, Е. А. Козловский Изд. ВСЕГЕИ Т. 1: А - И. – 2004. – 649 с.: ил. Т. 2: К - П. – 2006. – 602 с.: ил. – Т. 3: Р - Я. – 2007. – 570 с.: ил.
205. Рудничная вентиляция и борьба с подземными пожарами. А.А. Харев Учебник для техникумов. – 3-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Издательство «Недра», 1985. – 248 с.
206. Руководство по проведению депрессионных и газовых съёмов в угольных шахтах. М.: Недра 1975. – 64 с.
207. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – М.: изд. Недра, 1975. – 238 с.
208. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Макеевка-Донбасс, Изд. МакНИИ 1989. – 320 с.
209. Сабанов, С.М., Кобылкин, С.С. Анализ системы проветривания на сланцевых шахтах Эстонии // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – 2011. – № 7. – С. 354-362.
210. Савенков, Е.А. Обоснование параметров вентиляторов-эжекторов для сквозного проветривания транспортных тоннелей в период их сооружения: дис.... канд. техн. наук: 25.00.20/Савенков Евгений Алексеевич. – СПб., 2015. – 113 с.
211. Сборник инструкций к правилам безопасности в угольных и сланцевых шахтах. – М.: изд. Недра, 1964. – 264 с.

212. Сёмин, М.А. Обоснование параметров систем вентиляции рудников в реверсивных режимах проветривания: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20/ Сёмин Михаил Александрович. – Пермь, 2016. – 150 с.
213. Сёмин 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.
214. Синявина, С.В. Обоснование параметров теплового режима горных выработок с рельсовыми транспортными средствами в суровых климатических условиях: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20/ Синявина Светлана Викторовна – СПб., 2016. – 123 с.
215. Скопинцева, О.В., Вертинский, А.С., Иляхин, С.В., Савельев, Д.И., Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 17-20.
216. Скопинцева, О.В. Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах: дис. ... докт. техн. наук: 05.26.03/ Скопинцева Ольга Васильевна. – М., – 2012. – 379 с.
217. Скопинцева, О.В., Лебедев, В.С. Остаточные газовые компоненты угольных пластов: состав, содержание, потенциальная опасность // Горный журнал. – 2017. – № 4. – С. 84-86.
218. Скоринский, А.А. Рудничная атмосфера. Второе издание. – Москва-Ленинград-Новосибирск: Государственное научно-техническое горно-геолого-нефтяное изд., 1933. – 164 с.
219. Скоринский, А.А. Рудничный воздухъ и основной законъ движениа его по выработкамъ. СПб.: Типография П.П. Сойкина, Стремянная, 12. – 1904. – 203 с.
220. Скоринский, А.А., Комаров, В.Б. Рудничная вентиляция: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Углетехиздат, 1959. – 632 с.
221. Скоринский, А.А., Комаров, В.Б. Рудничная вентиляция: Учебник для вузов. Москва-Ленинград: Углетехиздат, 1949. – 443 с.

222. Скочинский, А.А., Ксенофонтова, А.И. Сборник задач по курсу рудничной вентиляции. – М.: изд. МГИ, 1947. – 300 с.
223. Смирнов, О.В., Айруни, А.Т. Взрывы газопылевоздушных смесей в угольных шахтах. – Липецк: Липецкое издательство, 2000. – 208 с.
224. Смолуховский, М. Влияние твёрдых стенок и внешних или внутренних сил на диффузию / Сборник статей А. Эйнштейна и М. Смолуховского «Брауновское движение». Перевод Федченко К.И.. под редакцией Давыдова Б.И. С дополнительными статьями Круткова Ю.А. и Давыдова Б.И. Ленинград: Изд. ОНТИ. – 1936. – С. 366-392.
225. Смолуховский, М. Средний путь газовых молекул и его связь с теорией диффузии / Сборник статей А. Эйнштейна и М. Смолуховского «Брауновское движение». Перевод Федченко К.И.. под редакцией Давыдова Б.И. С дополнительными статьями Круткова Ю.А. и Давыдова Б.И. Ленинград: Изд. ОНТИ – 1936. – С. 117-133.
226. Советов, Б.Я., Яковлев, С.А. Моделирование систем: Учебник для вузов по спец. «Автоматизированные системы управления». – М.: Высш. шк., 1985. – 271 с., ил.
227. Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности / Г.А. Поздняков, Б.Ф. Кирин, Е.И. Воронцова и др.; под ред. А. С. Кузьмича. – М.: Недра, 1982. – 240 с.
228. Справочник по рудничной вентиляции. Под ред. К.З. Ушакова. – М.: изд. Недра, 1977. – 382 с.
229. Справочник по рудничной вентиляции. Под редакцией Ксенофоновой А.И. М.: Государственное научно-техническое издательство по горному делу – 1962. – 692 с.
230. Справочника по рудничной вентиляции. Под редакцией К.З. Ушакова. – М.: Изд. «Недра», 1977. – 328 с.
231. Стандарт организации «Проектирование системы отопления, вентиляции и кондиционирования в коммуникационных коллекторах» <http://www.moscollector.ru/technicinf/> (дата обращения 08.10.2017)

232. Тимошенко, А.М., Баранова, М.Н., Никифоров, Д.В., Белавенцев, Л.П. Некоторые аспекты применения нормативных документов при проектировании высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт. Кемерово: ООО «ВостЭко», – 2010. – С. 5-15.
233. Ушаков В.К. Компьютерное моделирование шахтных вентиляционных систем при развитии горных работ Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1997. – № 4. – С. 178-180.
234. Ушаков, В.К. Принципы экономического анализа надежности и эффективности функционирования шахтных вентиляционных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1998. – № 6. – С. 201-203.
235. Ушаков, В.К. Проблема надежности и эффективности шахтных вентиляционных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 4. – С. 240-248.
236. Ушаков, В.К. Синтез надежных и эффективных шахтных вентиляционных систем: дис.... докт. техн. наук: 05.26.04 / Ушаков Владимир Кимович. – М., 1997. – 527 с.
237. Ушаков, В.К. Статистические характеристики случайного процесса аэродинамического старения горных выработок при моделировании аэрологической безопасности труда // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 11. – С. 210-219.
238. Ушаков, В.К., Баловцев С.В. Методы оценки аэрологического риска на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – № 3. – С. 170-176.
239. Ушаков, К.З. Газовая динамика шахт. - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 481 с.: ил.

240. Ушаков, К.З., Бурчаков, А.С., Пучков, Л.А., Медведев, И.И. Аэрология горных предприятий: Учебник для вузов. – 2е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 440 с.
241. Ушаков, К.З., Бурчаков, А.С., Пучков, Л.А., Медведев, И.И. Аэрология горных предприятий: Учебник для вузов. – 3-е изд.. перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 421 с.
242. Ушаков, К.З., Косарев, В.Д., Филин, А.Э. Теория и практика пульсирующей вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень, Изд. «Горная книга». – 2000. – № 1. – С. 225-228.
243. Ушаков, К.З., Филин, А.Э. Результаты экспериментов по влаго- и теплопереносу на модели горной выработки при пульсирующем режиме вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – Т. 12. № 1. – С. 57-60.
244. Ушаков, К.З., Филин, А.Э., Фомина, Ю.Г., Скотов, В.В., Казаев, Р.Г. Разрушение скоплений метана методом пульсирующей вентиляции в условиях шахты «Заполярная» ОАО «Воркутауголь» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. – № 7. – С. 24-25.
245. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по изоляции неиспользуемых горных выработок и выработанных пространств». Серия 05. Выпуск 43. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – 2015. – 56 с.
246. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по контролю состава рудничного воздуха, определению газообильности и установлению категорий шахт по метану и/или диоксиду углерода». Серия 05. Выпуск 34. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – 2014. – 64 с.

247. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и предупреждению взрывов пылегазовоздушных смесей в угольных шахтах». Серия 05. Выпуск 25. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – 2014. – 52 с.
248. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по определению инкубационного периода самовозгорания угля» Серия 05. Выпуск 38. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – 2014. – 24 с.
249. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по составлению вентиляционных планов угольных шахт». Серия 05. Выпуск 33. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – 2014. – 24 с.
250. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» Серия 05. Выпуск 40. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – 2014. – 200 с.
251. Филин, А.Э. Научное обоснование разработки средств ликвидации скоплений газа в горных выработках методом пульсирующей вентиляции: дис.... докт. техн. наук: 05.26.02/ Филин Александр Эдуардович. – М., 2009. – 306 с.
252. Филин, А.Э. Метод пульсирующей вентиляции для дезинтеграции скоплений метана в горных выработках угольных шахт / Филин А.Э. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – Т. 13. № 1. – С. 255-261.
253. Филин, А.Э. средства повышения эффективности проветривания газобильных горных выработок / Филин А.Э. // Горная промышленность. – 2008. – № 5 (81). – С. 60-61.

254. Филин, А.Э. Определение рациональных параметров средств генерации пульсирующего режима в условиях угольных шахт по результатам математического моделирования / Филин А.Э. // Горный информационно-аналитический бюллетень, Изд. «Горная книга» № S3. – 2006. – С. 85-90.
255. Филин, А.Э., Кобзев, К.И., Колотилова, С.Е. Исследование процесса массопереноса при пульсирующей вентиляции в выработанном пространстве / Филин А.Э., Кобзев К.И., Колотилова С.Е. // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2011. – № 9. – С. 35-41.
256. Форсюк, А.А., Кобылкин, С.С. Влияние личностного фактора на создание опасных ситуаций / Форсюк А.А., Кобылкин С.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Тем. пр. «Безопасность». – С. 351-353.
257. Форсюк А.А., Кобылкин, С.С. Человеческий фактор и безопасность производства / Форсюк А.А., Кобылкин С.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИ-АБ) – М.: Изд. «Горная книга» – 2009. – Тем. пр. «Безопасность». – С. 156-160.
258. Харёв, А.А. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей. – М.: изд. Углетехиздат, 1954. – 248 с.
259. Харёв, А.А. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей. – Углетехиздат, 1954. – 246 с.
260. Хохолов, Ю.А. Прогноз теплового режима рудника с учетом динамики развития горных работ / Ю.А. Хохолов, Д.Е. Соловьев // Горный информ.-аналит. бюл. – 2009. – № 4. – С. 177–182.
261. Хохолов, Ю.А. Расчет температуры и воздухораспределения в сети горных выработок рудника «Айхал» / Ю.А. Хохолов // Наука и образование. – 2005. – № 1. – С. 25–28.
262. Хохолов, Ю.А. Совместное решение задач воздухораспределения и теплового режима в сети горных выработок криолитозоны / Ю.А. Хохолов // Гор- ный информ.-аналит. бюл. – 2003. – № 7. – С. 70–72.

263. Хохолов, Ю.А. Математическое моделирование тепловых процессов в горных выработках шахт и рудников Севера / Ю.А. Хохолов, Д.Е. Соловьев ; отв. ред. А.С. Курилко; Рос. акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т горного дела Севера им. Н.В. Черского. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2013. – 185 с.
264. Черненко, А.Ю., Филин, А.Э. Перспективы развития области применения пульсирующей вентиляции / Филин А.Э., Черненко А.Ю. // Горный информационно-аналитический бюллетень, Изд. «Горная книга» № 5 – 2002. – С. 11.
265. Чечотт, Г.О. К вопросу о проектировании вентиляции рудников. Решение задач в «диагональной» системе координат. С.-Пб, 1908. - изд. Т-ва А.Ф. Марксъ. – 160 с.
266. Шалимов, А.В. Численное моделирование газо-воздушных потоков в экстремальных ситуациях и аварийных режимов проветривания рудников и шахт // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых – 2011. – № 6. – С. 84-92.
267. Шувалов, Ю.В. Выбор параметров теплоаккумулирующих выработок сланцевых шахт (методика расчета) / Ю.В. Шувалов, С.Г. Гендлер, Г.Б. Фрайман. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1990. – 37 с.
268. Шувалов, Ю.В. Оценка возможности использования выработанного пространства шахт для подогрева воздуха / Ю.В. Шувалов, С.Г. Гендлер // Международное бюро по горной теплофизике: Докл. 8-го пленар. заседания, Санкт-Петербург, 14–18 сент., 1998. – СПб., 2000. – С. 27–30.
269. Шувалов, Ю.В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера: Ресурсосберегающие системы / Ю.В. Шувалов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. – 196 с.
270. Щербань, А.Н., Кремнев, О.А. и др. Охлаждение и осушение воздуха в глубоких угольных шахтах. – АН УССР, 1956. – 252 с.

271. Щербань, А.Н., Кремнев, О.А. Научные основы расчёта и регулирования теплового режима глубоких шахт: В 2-х томах. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – т. 1 – 430 с.
272. Щербань, А.Н., Кремнев, О.А. Научные основы расчёта и регулирования теплового режима глубоких шахт: В 2-х томах. – Киев: Изд-во АН УССР, 1960. – т. 2 – 347 с.
273. Щербань, А.Н., Кремнев, О.А. Основы теории и методы тепловых расчетов рудничного воздуха. – М.-Харьков: Углетехиздат, 1953. – 308 с.
274. Щербань, А.Н., Кремнев, О.А., Журавленко, В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт: Изд-во 3-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 359 с.
275. Щербань, А.Н. Упрощенные способы тепловых расчетов рудничного воздуха в шахтах Донбасса / Щербань А.Н., Ягельский А.Н., Баратов Э.И. // – Киев: Изд-во АН УССР, 1958. – 160 с.
276. Щербань А.Н., Ягельский, А.Н.. Кондиционирование рудничного воздуха. – Углетехиздат, 1956. – 352 с.
277. Эйнштейн, А. Новое определение размеров молекул // Сборник статей А. Эйнштейна и М. Смолуховского «Брауновское движение». Перевод Федченко К.И.. под редакцией Давыдова Б.И. С дополнительными статьями Круткова Ю.А. и Давыдова Б.И. Ленинград. Изд. ОНТИ – 1936. – С. 43-65
278. Эйнштейн, А. О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты // Сборник статей А. Эйнштейна и М. Смолуховского «Брауновское движение». Перевод Федченко К.И.. под редакцией Давыдова Б.И. С дополнительными статьями Круткова Ю.А. и Давыдова Б.И. Ленинград. Изд. ОНТИ – 1936. – С. 13-26
279. Эйнштейн, А. Элементарная теория брауновского движения // Сборник статей А. Эйнштейна и М. Смолуховского «Брауновское движение». Перевод Федченко К.И.. под редакцией Давыдова Б.И. С

- дополнительными статьями Круткова Ю.А. и Давыдова Б.И. Ленинград. Изд. ОНТИ – 1936. – С. 70-80
280. Эйнштейн, А., Смолуховский М. Брауновское движение // Сборник статей. Перевод Федченко К.И. под редакцией Давыдова Б.И. Изд. ОНТИ – Главная редакция общетехнической литературы, Ленинград, 1934. – 602 с.
281. Эпштейн, С.А., Кобылкин, С.С., Минаев В.И., Нестерова В.Г., Мейдель И.М., Новиков Е.А. Методы и средства прогноза склонности углей к самовозгоранию при их добыче и хранении / Методические указания по проведению лабораторных работ Московский государственный горный университет. – М.: МГГУ, 2013 г. – 50 с.
282. 新中国煤矿事故状况 主讲:蔡成功 教授河南理工大学 二〇一〇年九月六日. (Mine ventilation and safety) – 2010. – 269 p.
283. BP Statistical Review of World Energy 2017 <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
284. Р 2.2.2006-05. 2.2. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 29.07.2005) http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_85537/ [Офиц. сайт] (дата обращения: 12.06.2016)
285. Kundt, E. Warburg Uber Reibung und Wärmeleitung verdunnter Gase // Annalen der Physik und Chemie Band CLVI № 10. Bd. 155 – 1875, – pp. 177-211
286. Acuna, E.I., Hurtado, J.P. A summary of the Comoutational fluid dynamic application to the new level mine project of El teniente // 10th Internrtional Mine Ventilation Congress, IMVC2014. The Mine Ventilation Society of South Africa. – 2014. – 91-97 p.

287. Acuna, E.I., Hurtado, J.P., Wallace, K.G. A summary of the computational fluid dynamic application to the new level mine project of El Teniente // 10th International mine ventilation congress, IMVC2014, The mine ventilation Society of South Africa. – 2014. – pp. 91-97.
288. Aguirre J. R. P. Ventilation planning at the Minerales Monclova's Mines // 12th U.S. / North American Mine Ventilation Symposium. – 2008. – pp.115-119.
289. Airey, E.M. Gas Emission from Broken Coal: An Experimental and Theoretical Investigation. Intl. J. Rock Mechanics Mng. Sci. (Oxford). – 1968. – Vol. 5, №. 6, November. – pp. 475-494.
290. Aldridge, M.D. The WVU Ventilation Monitoring System for Coal Mines // Proc. International Mine Ventilation Congress. Mine Ventilation Society of South Africa, Johannesburg, 1975. – pp. 157-162.
291. Aminossadati, S.M., Hooman, K. Numerical Simulation of Ventilation Air Flow in Underground Mine Workings // 2th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, – pp. 253-259.
292. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 15.0. ANSYS, Inc., November 2013. – 768 p.
293. Atkinson, J.J. Friction of air in mines // New York. D. Van Nostrand, Publisher. – 1875. – 69 p.
294. Barenburg, A.W.T. Natural ventilation // Journal of Mine Ventilation Society of South Africa. Johannesburg, vol. 23, No. 7. July, 1970 – pp. 89-100 ISSN 0368-3206.
295. Biswas, N. The effect of periodic Variations in temperature and humidity of air due to seasonal and diurnal changes on climate in underground roadways // Mng. Minl. Eng. London, Vol. 2, No. 6, june, 1966 pp. 219-225.
296. Bruzewski, R.G., Aughenbaugh N.E. Effect of weather on mine air // Mng. Cong. J., Vol. 63, No. 9, September, 1977 pp. 23-25.
297. Cervik, J. Behavior of Coal Gas Reservoirs, USBM, T.P.R.. 1969. №. 10.

298. Cross, H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors // University of Illinois bulletin. – 1936. – Vol. XXXIV № 2. – 33 p.
299. Curl, S.J. Methane Prediction in Coal Mines // IEA, Coal Research Report, London 1978. №. ICTIS/TR 04.
300. Cygankiewicz, J. Determination of critical conditions of spontaneous combustion of coal in longwall gob areas // Arch Min. Sci., 2015. – Vol. 60, № 3. –pp. 761-776.
301. D'Aubuisson M. Experiences faites sur la trompe du ventilateur des mines de Rancie, suivies de quelques observations sur les trompes en general // Annales des mines. France. Tome IV. – 1828. – pp. 211-244.
302. Davidson, L. An introduction to turbulence models, Department of Thermo and Fluid Dynamics // Chalmer University of Technology, Publication 97/2, Sweden, 2003. p. 1–8.
303. DieselNet (2012). Emissions Standards: United States. США, [Офиц. сайт]. URL: <https://www.dieselnet.com//standards/us/nonroad.php> (дата обращения: 30.08.2016)
304. Dunmore, R. Towards a Method of Prediction of Firedamp Emission for British Coal Mines // Proc. Second International Mine Ventilation Congress. AIME, New York, 1980. pp. 351-364.
305. Firgane, B. Karolczak Z., Krzystanek Z. Marcinkowski K. Control of Ventilation Processes in Coal Mines // Proc. international Mine Ventilation Congress, Mine Ventilation Society of South Africa, Johannesburg, 1977. pp. 169-177.
306. Girard, M. P.-S. Sur l'Ecoulement uniforme de l'air atmospherique et du gas hydrogen carbone, dans des wyaux de conduit // Annales de chimie et de physique. France. Tome Seizieme. – 1821. – pp. 129-152.
307. Greuer, R.E. The naturel ventilation of mine // Wharve, Graduate study magazine, mich. Tech. U., summer, 1971 – pp. 16-21.

308. Hall, C.J. Determination of natural ventilation pressure and shaft resistance by the motive column method // Can. Mng. Met. Bull. Montreal, vol. 61, No 673, may 1968, – pp. 619-628.
309. Hall, C.J. Mine ventilation engineering. SME-AIME, New York. – 1981. –132 p.
310. Hall, C.J. Whhat is the natural ventilation pressure? Journal of Mine Ventilation Society of South Africa. Johannesburg, vol. 29, No. 9. september, 1976 – pp. 165-168.
311. Hinsley, F.B. New method of calculating the natural ventilation pressure in mine. Colliery Guard. London, Vol. 211, No. 5454, October 29. 1965. – pp. 653-656.
312. Howard L. Hartman Mine Ventilation and conditioning / Second edition. – Florida: Krieger publishing company Malabar, 1991. – 791 p.
313. Information Circular 9486 Handbook for Methane Control in Mining By Fred N. Kissell, Ph.D. DHHS (NIOSH) Publication No. 2006–127. – pp. 188.
314. Janusz Szmyd, Marian Branny, Michal Karch, Waldemar Wodziak, Marek Jaszczur, Remigiusz Nowak Experemental and numerical analysis of the air flow in T-shape channel flow. Arch. Min. Sci., Vol. 58 (2013), No 2, p. 333-348.
315. Kachurin, N.M., Vorobev, S.A., Levin, A.D., Botov, F.M. Theoretical substantiation and practical results of underground workings ventilation simulation. Eurasian Mining – 2015. – №2 – pp. 12-15.
316. Kaledina, N.O. Kobylkin, S.S. Ventilation of blind roadways in coal mines: problems and solutions. «Eurasian Mining» – №2-2015. – pp. 26-30.
317. Kaledina, N.O., Kobylkin, S.S., Kobylkin, A.S. The calculation method to ensure safe parameters of ventilation conditions of goaf in coal mines. «Eurasian Mining» №1-2016 pp. 41-44.
318. Kirchhoff, G. Üeber die Auflösung der Gleichungen, auf welche man bei Untersuchung der linearen Vertheilung, galvanische Ströme geführt wird.

- Leipzig; Annalen der Physik und Chemie (Poggendorf), 1847, Bd. 72, N 12, pp. 497-508.
319. Kissell, F.N., Edwards, J.C. Two-Phase Flow in Coal Beds, USBM. R.I., 1975. №. 8066.
 320. Launder, B.E., Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flow // *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.* 1974. Vol. 3, No. 2. p. 269–289.
 321. Levin, L.Yu., Semin, M.A., Klyukin, Yu.A. Estimation of wall roughness functions acceptability in CFD simulation of mine ventilation networks // *Proceedings of Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics 2014»*. – 2014. – pp. 25-32.
 322. Loschmidt Experimental – Untersuchungen uber die diffusion von gasen. Wien. Sitzungsber. 1870, Bd. 63, S. 63
 323. Lourenco, L., Shih, C. Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder, a particle image velocimetry study 1993
 324. Luxbacher, G.W., Ramani R.V., Optimization of Coal Mine Ventilation Systems, *Trans. SME-AIME*, 1979. Vol. 266, pp. 1801-1816.
 325. Luxbacher, G.W., Ramani, R.V. Stefanko R. Advance of Mine Ventilation Network Analysis from Art to Science, Vol. 6, U. S. Department of Commerce, 1977. NTIS: PB 290 197/AS.
 326. Luxbacher, G.W., Ramani, R.V. The Interrelationships between Coal Mine Plant and Ventilation System Design, *Proc. Second International Mine Ventilation Congress. AIME*, New York, 1980, pp. 73-82.
 327. Maxwell, J.C. On the dynamical theory of gases, *The Scientific Papers of J. C. Maxwell*, Ueber das gleichgewicht und die bewegung, insbesondere die diffusion von gasgemengen. Wien. Sitzungsber. 1870, Bd. 62, S.468. – 1965. – 2. – pp. 26-78.
 328. Maxwell, J.C. (1860). Illustrations of the dynamical theory of gases. *Philosophical Magazine*, 19, 20, 19-32, 21-37. Quotations from Brush et al. – 1986. – 286–318.

329. Maxwell, J.C. On the Dynamical Theory of Gases. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Vol. 157 (1867), URL: <http://www.jstor.org/stable/108968> pp. 49-88.
330. Maxwell, J.C. Philos. Mag. 1860, 4-th.ser., vol. 19, p. 31.
331. McElroy, G.E. Engineering factor in the ventilation of metal mines / G.E. McElroy // US Bureau of Mines Bull 385. Johannesburg. – 1935. – pp. 55-68.
332. McPherson, M.J. Mine Environmental Monitoring and Control, Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry, A. Weiss, ed. AIME, New York, 1979. – pp. 705-716.
333. Menter, F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. –1994. – vol. 32(8). – p. 1598-1605.
334. Menter, F.R. Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows //AIAA Paper. 1993. N93-2906. – 21p.
335. Menter, F.R., Egorov, Y.A. Scale-Adaptive Simulation Model using Two-Equation Models // AIAA Paper, AIAA 2005, – 1093-1095 p.
336. Meyer, O.E. Kinetische theorie der gase / O.E. Meyer // Breslau. 1877. – 340 p.
337. Mine Rescue Team Training Coal Mines. U.S. Department of Labor Mine safety and Health and Safety Academy. MSHA 3028 (Formerly IG7) Revised 2008. – 3-67 p.
338. Nicholas Kapea, Benjamin Goertz Development of mine dust sampling device for use in underground coal mines. 16th North American Mine Ventilation symposium. Colorado USA. 2017. – pp. 267-273.
339. Mines rescue, gas detection and emergency preparedness. Mines rescue in NSW. Australia. – 1985 pp. 362.
340. Navier, Memoire sur les lois du mpuvement des fluids (Memoires de l'Acad. De sciences de l'institut de France Paris, t. VI 1823, p. 389.
341. Niskanen P. Automated Regulation of Mine Ventilation. Tenth International Symposium on the Application of Computer Methods in the Mineral Industry,

- South African Institute of Mining and Metallurgy, Marshalltown, 1973. pp. 167-271.
342. Chapmen, S., Cowling, T.G. The mathematical theory of non-uniform gases / Sydney Chapmen, T.G. Cowling // Cambridge. – 1960. – 254 p.
 343. PAC, 1990, 62, 2167 (Glossary of atmospheric chemistry terms (Recommendations 1990)), page 2217 // UPAC Compendium of Chemical Terminology, Electronic version [Офиц. сайт]. URL: <http://goldbook.iupac.org/html/S/S06036.html> дата обращения: 12.06.2016)
 344. Prusek, S. Changes in cross-sectional area of gateroads in longwalls with roof caving, ventilated with «U» and «Y» systems. Arch Min. Sci., Vol. 60 (2015), № 2, pp. 549-564.
 345. Przemyslaw Skotniczny Three-dimensional numerical simulation of the mass exchange between longwall headings and goafs, in the presence of methane drainage in a U-type ventilated longwall. Arch. Min. Sci., Vol. 58 (2013), No 2, p. 705-718.
 346. Puchkov, L.A., Kaledina, N.O., Kobylkin, S.S. Systemic approach to reducing methane explosion hazard in coal mines «Eurasian Mining» №2-2015 pp. 3-6.
 347. Puchkov, L.A., Kaledina, N.O., Kobylkin, S.S. Designing of ventilation of mines as multisplit-systems. European Science and Technology. Materials of the IV international research and practice conference, Vol. I, Munich, April 10th – 11th, 2013 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, – 2013. – pp. 317-323.
 348. Ress, J.P. Ventilation calculations. Transvaal Chamber of Mine, Johannesburg. – 1950.
 349. Seppanen, P., Laatio, E., aakikinen, U. Computer Controlled Mine Ventilation System at the Pyhasalmi Mine. Finland. Computer Methods for the 80s in the Mineral Industry, A. Weiss, ed., AIME. New York, – 1979. – pp. 717-723.
 350. SIA 196 (Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein). Bauluftung im untertagbau. – 1983. – 63 p.

351. Skotniczny, P. Three-dimensional simulation of the mass exchange between longwall headings, in the presence of methane drainage in a U-type ventilated longwall. Arch Min. Sci., – 2013. – Vol. 58, № 3, – pp. 705-718.
352. Stefan, J. Über das Gleichgewicht und Bewegung, insbesondere die Diffusion von Gemischen, Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften Wien, 2te Abteilung a, 1871. – pp. 63-124.
353. Stinnette, J.D., De Souza E. Establishing total airflow requirements for underground metal/nonmetal mines with tier iv diesel equipment. 23rd World Mining Congress. Montreal. – 2013. – 14 p.
354. Stokes, G.G. On the theories of the internal friction on fluid in motion and of the equilibrium and motion of elastic solides. Mathematical and physical papers b. G.G. Stokes, I, Cambridge – 1880. – pp. 75.
355. Strang, J., Mackenzie-Wood P., Roxborough F.F. A manual on mines rescue and gas detection. Australia. Ontario – 2014. – pp. 652
356. Szmyd, J., Branny, M., Karch M., Wodziak W., Jaszczur M., Nowak R. Experimental and numerical analysis of the air flow in T-shape channel flow measurements. Arch Min. Sci., 2013. – Vol. 58, № 2. – pp. 333-348.
357. Tong Yang. CFD and Field Testing of a Naturally Ventilated Fullscale Building, PhD dissertation. The University of Nottingham. – 2004. –268 p.
358. Clausius, R. Ueber die Wärmeleitung gasformiger Körper. Pogg. ann. Januarcheft 1862 (Bd. CXV) URL: <https://archive.org/details/diemechanischew04claugoog>
359. Wachowicz, J., Laczny, J.M., Iwaczenko, S., Janoszek T., Cempa-Balewicz M. Modelling of underground coal gasification process using CFD methods. Arch Min. Sci., 2015 – Vol. 60, № 3. – pp. – 663-676.
360. Wala, A.M., Gillies, A.D.S., Wu H.W. Lessons from an underground coal mine fire in Australia using retrospective numerical simulation study. Society of mining engineers annual conference. Preprint 04. February. Colorado– 2004. – p. 2-12.

361. Wala, A.M., Vytla, S., Taylor, C.D., Huang G., Mine face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for CFD code validation. *Mining Engineering*, 2007. – Vol. 59. – pp. 10-17.
362. Wala, A.W., Stoltz, J.R., Jacob, J.D., Numerical and experimental study of a mine face ventilation system for CFDcode validation. *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, Krakow*, – 2001. – pp. 411-418.
363. Weeks, W.S. *Ventilation of mines*, McGraw-Hill, New York. – 1926. – 45 p.
364. Wierzbiki, M. The Relationship between rock fracturing and methane inflow into the drainage holes on the basis of coal mine measurements. *Arch Min. Sci.*, 2013. – Vol. 58, № 1. – pp. 21-36.
365. Wilcox, D.C. *Turbulence modeling for CFD*. – 1998. – 537 p.
366. Yi Zhebg, Jerry C. Tien, Ying Li Comparison of diffuser assisted ventilation and Push-pull systems for DPM Control in a Dead-end Entry 16th North American Mine Ventilation symposium. *Colorado USA*. – 2017. – pp. 149-158.

Приложение 1. Перечень компьютерных программ для расчёта воздухораспределения

Программные комплексы, применяемые в России:

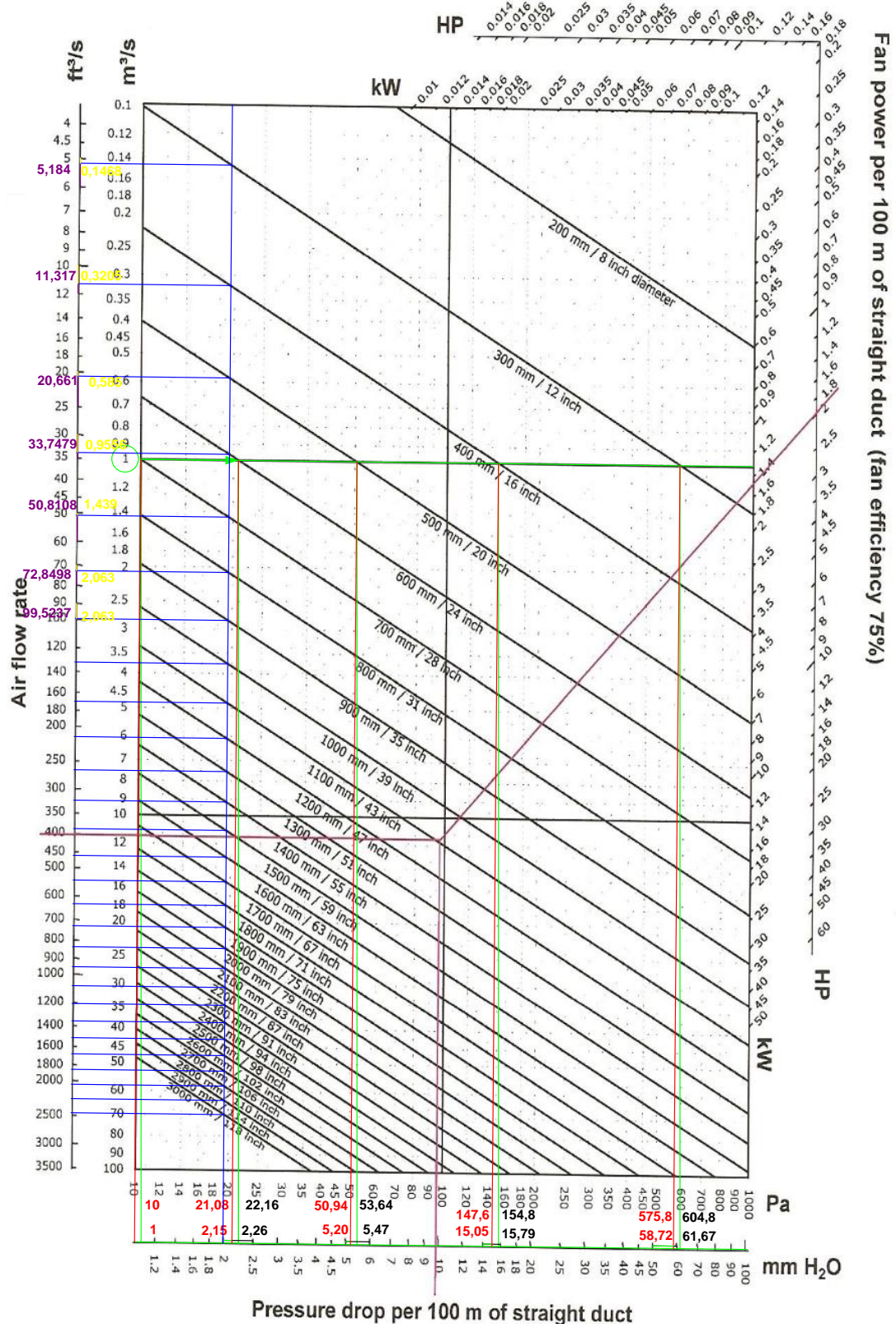
1. «АэроСеть» (программа разработана в Горном институте УрО РАН [3], разработчики Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З., Мохирев Н.Н., Казаков Б.П., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Сёмин М.А., Кормщиков Д.С. и др.);
2. «Динавент» (программа разработана в МГГУ. разработчики: Шкундин С.З., Петров А.Г., Иванников А.Л., Танцов П.Н., Вановский В. и др. [50]);
3. «Вентиляция 2.0» (программа разработана в ООО «ИнформТБУголь» разработчики Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. и др. [191]);
4. «ВентПЛА» (программа разработана в ЗАО «Промтех», разработчики Романченко С.Б. и др.);
5. «Вентиляция шахт» (программа разработана в ЗАО «Гипроуголь» разработчики Шрейдер Д.Я., Логинов Я.В. [34]);
6. «РЕВОД» («Расчёт естественного воздухораспределения и обработка депрессионной съемки», программа разработана на Украине, разработчик доцент кафедры ЭВМ Назаренко В.И. ДонГТУ [165, 166]);
7. «АРМ Вентиляция 5.5.0» (программа разработана на Украине разработчики НПО «Респиратор»);

Зарубежные:

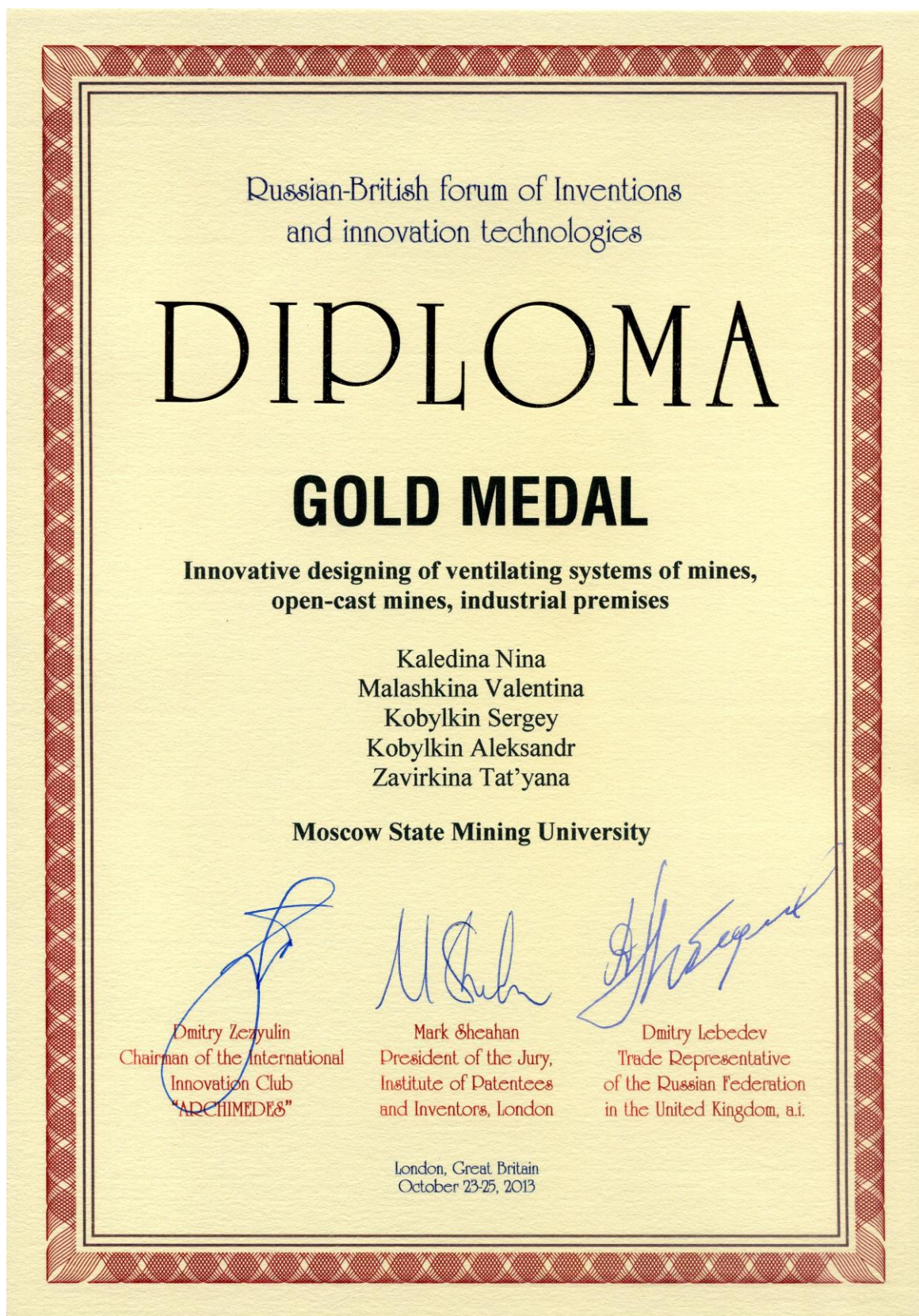
8. VentPC (Mine Ventilation Services, Inc, США);
9. Ventsim (Chasm Consulting, Австралия);
10. 3DVent – 矿井通风软件 (КНР);
11. VENTGRAPH (Австралия) [360];
12. VUMA (Bluhm Burton Engineering Pty Ltd, ЮАР) и др.

Приложение 2. Номограмма для определения падения давления на 100 м
прямого участка воздуховода

Nomogram for dimensioning



Приложение 3. Дополнительные документы





КУЗБАССКАЯ ЯРМАРКА



Всемирная ассоциация выставочной индустрии



Российский союз выставок ярмарок



Торгово промышленная палата РФ

ДИПЛОМ ЗОЛОТАЯ МЕДАЛЬ

НАГРАЖДАЕТСЯ

**ГОУ ВПО «Московский
государственный горный
университет»
(г. Москва)**

за инновационное проектирование вентиляционных
систем шахт, рудников, карьеров, производственных
помещений,

представленное на конкурс «Лучший экспонат»,
проводимый в рамках

XVIII Международной специализированной выставки

«УГОЛЬ РОССИИ и МАЙНИНГ- 2011»

и II специализированной выставки

**«ОХРАНА, БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА
И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»**

Генеральный директор
ЗАО «Кузбасская ярмарка»

В.В. Табачников

г. Новокузнецк
10 июня 2011 г.



Представительство общества с ограниченной ответственностью «Тиссен Шахтбау ГмбХ» (Германия)
Российская Федерация, 663330, Красноярский край, г.Норильск, тер. Рудник Октябрьский, а/я 1428

11.12.2017 № TS-6/ 2479 /BC/CKC

На № _____ от _____

Справка

о внедрении диссертационной работы
горного инженера, к.т.н., доцента Кобылкина С.С.
на тему

«Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт»

Результаты диссертационного исследования Кобылкина Сергея Сергеевича на тему «Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт» используются при проектировании проветривания строящихся стволов BC-10 и CKC-1 с сопряжениями примыкающих выработок горизонтов и выработками околоствольного двора рудника «Скалистый», шахты «Глубокая» ПАО ГМК «Норильский Никель».

Использование результатов исследования С.С. Кобылкина позволяет:

- обеспечить эффективное проветривание в соответствии с требованиями ПБ;
- повысить безопасность ведения горных работ по аэрологическим факторам;
- снизить затраты на систему вентиляции строящихся объектов за счет оптимизации схем проветривания.

И. о. Начальника УС

Представительства общества с

ограниченной ответственностью «Тиссен

Шахтбау ГмбХ» (Германия)



А. М. Широков

ИНН 9909135710 КПП 245751001 БИК 044525101
Р/с 40807810700000000151 в ООО Дойче Банк, г. Москва
Р/с 40807810500000000267 в ООО Дойче Банк, г. Москва
К/с 30101810100000000101

sekretariat.nonils@ts-gruppe.com
Тел. +79039299731
Факс +73919220592
www.thyssen-schachtbau.de



Сергей Кобылкин
Аспирант кафедры
Аэрологии и охраны труда
Московского государственного
горного университета

06 декабря 2010 ЕК-ЖН2- 210

СПРАВКА

Результаты научно-исследовательских работ по проветриванию шахты "Эстония" АО Ээсти Энергия Казвандусед и данные численного моделирования аэродинамических процессов, полученные аспирантом кафедры Аэрологии и охраны труда Московского государственного горного университета Кобылкиным Сергеем Сергеевичем, могут быть использованы при дальнейшем планировании горных работ и позволят оптимизировать проветривание горных выработок шахты.



Игорь Агутин
Главный инженер
шахта Эстония
АО Ээсти Энергия Казвандусед



EESTI ENERGIA KAEVANDUSED AS	ESTONIA KAEVANDUS
Jaama 10 41533 JÕHVI	Väike-Pungerja küla
Tel 336 4801	41301 Mäetaguse vald
Faks 336 4803	Ida-Virumaa
Reg. kood 10032389	Tel 336 5324
kaevandused@energia.ee	Faks 336 5683

ГУП «МОСКОЛЛЕКТОР»

Стандарт организации

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по науке и инновациям
НИТУ «МИСиС»


М.В. Филонов

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер

ГУП «Москоллектор»


В.А. Глухоедов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ В КОММУНИКАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ


СТО ГУП «Москоллектор» 05.01-2017

СОГЛАСОВАНО:

Начальник СТБК
ГУП «Москоллектор»


Т.Н. Гордюшина

Начальник
производственно-технического
отдела ГУП «Москоллектор»


А.Ю. Калядин

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ:

Руководитель темы,
проф., д.т.н.



_____ Н.О. Каледина

Исполнители:


проф., д.т.н.


_____ В.А. Малашкина

доцент, к.т.н.


_____ С.С. Кобылкин

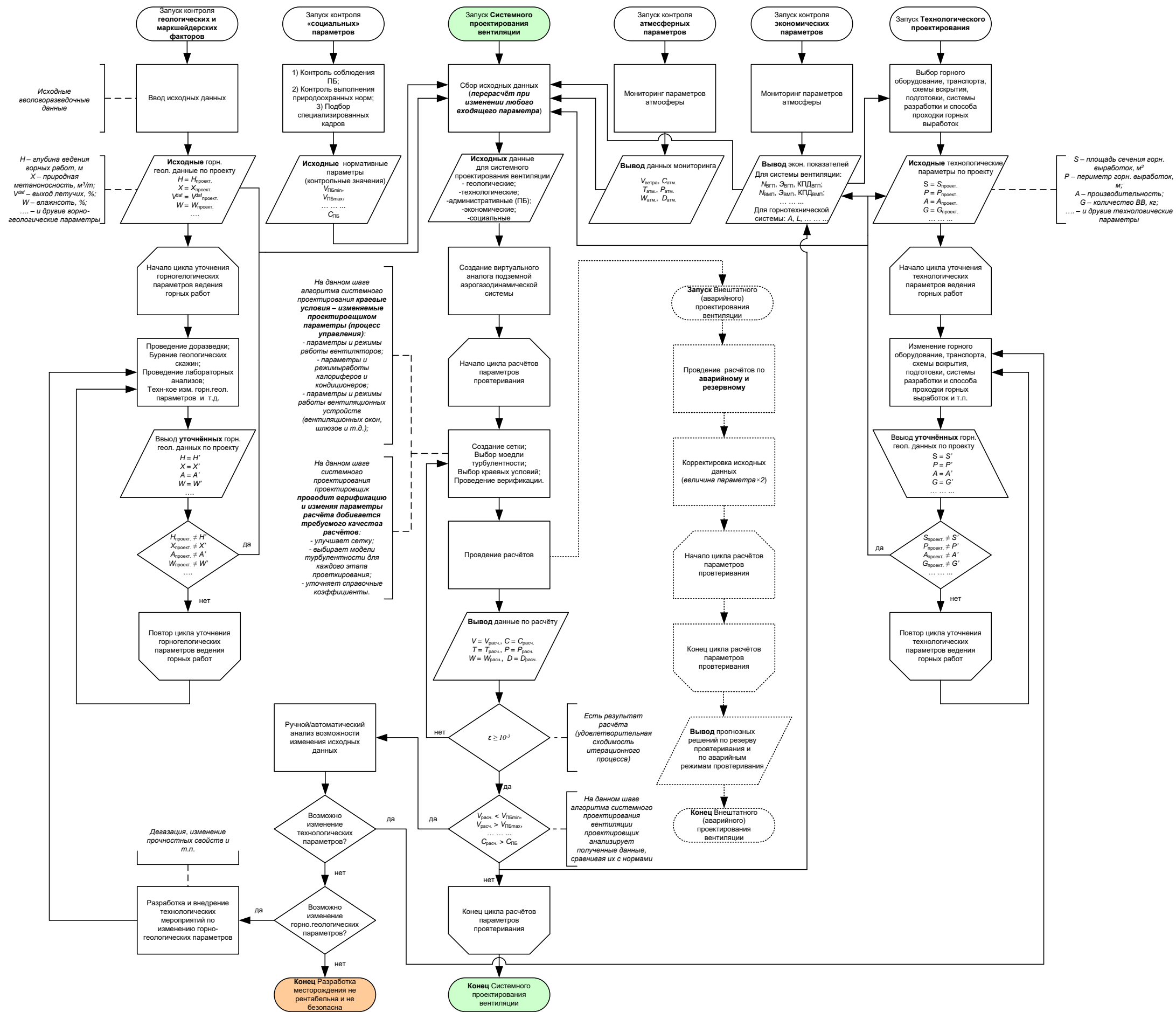
доцент, к.т.н.


_____ О.В. Воробьева

ст. преподаватель


_____ Т.В. Завиркина

Приложение 4. Алгоритм системного проектирования вентиляции шахт



Приложение 5. Перечень НИР в которых использовались результаты исследований

Разработанный методологический подход был использован в качестве апробации при выполнении Государственных контрактов:

- 1) тема «Исследование газодинамических процессов, протекающих при ведении горных работ и эксплуатации подземных сооружений мегаполисов, для обеспечения аэрогазовой безопасности», Государственный контракт № 9001p/14049, 2011-2012 гг.;
- 2) тема «Исследование процессов тепломассопереноса в выработанных пространствах угольных шахт для определения условий предотвращения эндогенных пожаров», Государственное задание № 2014/113, проект № 36, 2014- 2016 гг.;
- 3) тема «Разработка научно обоснованных предложений по аэрологическому обеспечению очистных и проходческих забоев угольных шахт, расчету параметров и организации проветривания особо опасных по горно-геологическим условиям угольных шахт», Государственный контракт № 17/0411.3070390019.241/11/161, 2017 г.;
- 4) тема «Исследование закономерностей аэрогазодинамических процессов выемочных участков газообильных угольных шахт на основе объемного компьютерного моделирования», Государственное задание проект АОТ-908ДС, 2012-2014 г.,
а также при проведении научных работ:
- 5) по улучшению проветривания угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс» 2016-2017 гг. (тема «Разработка методических материалов для программ профессионального обучения по рабочим профессиям по теме: «Научно обоснованные предельные концентрации метана в исходящих струях очистного забоя и выемочного участка»», шифр 1673009);
- 6) по улучшению проветривания объектов подземного строительства компании «Тиссен Шахтбау ГмбХ» (Германия) 2012-2013 гг. (тема

«Расчёт и моделирование процесса вентиляции строящихся стволов ВС-10 и СКС-1 шахты «Скалистая» рудника «Комсомольский» Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель» с учётом экспериментально измеренных аэродинамических параметров», шифр 1573001 и теме «Определение температурного режима в стволах ВС-10 и СКС-1, строящегося рудника «Скалистый» ЗФ ОАО «ГМК» «Норильский Никель»);

- 7) при оптимизации и улучшения проветривания подземных объектов коллекторов ГУП «Москоллектор» (темы «Теоретические исследования состояния проветривания коммуникационных коллекторов» 2014-2015 года, «Обоснование проведения измерений параметров газовой среды в коммуникационных коллекторах», шифр 1673003, 2016-2017 гг., тема «Разработка строительных норм и правил на проектирование системы отопления, вентиляции и кондиционирования в коммуникационных коллекторах», шифр 1673002, 2016-2017 гг.). На базе разработанной методологии были проведены исследования и разработан внутренний стандарт организации «Проектирование системы отопления, вентиляции и кондиционирования в коммуникационных коллекторах» [293] (Приложение 3).

Работа является продолжением выполненных ранее исследований [94], результаты которых были внедрены в процессе подготовки кандидатской диссертации

- 1) на сланцевой шахте «Эстония» компании Eesti Energia (АО «Ээсти Энергия Каэвандусед») (Приложение 3);
- 2) на угольной шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» (Приложение 3).

По выполненной работе были получены награды Золотая медаль Russian-British forum of Inventions and innovation technologies 2013 год и Золотая медаль «Кузбасской ярмарки» в рамках XVIII Международной специализированной

выставки «Уголь России и Майнинг – 2011» и II Специализированной выставки «Охрана, безопасность труда и жизнедеятельность» 2011 год (Приложение 3).

При выполнении научно-исследовательских работ и внедрении результатов диссертационного исследования применялся единый методический подход. На объекте исследования проводились натурные измерения, разрабатывалась трёхмерная модель (виртуальный аналог), проводилась верификация моделей (раздел 6.1), после чего по разработанному алгоритму (раздел 5.4) разрабатывались решения по улучшению вентиляции. Натурные измерения при верификации производились по единой методике.