

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»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва, 2018

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), на кафедре «Безопасность и экология горного производства» Горного института

**Научный консультант:** Каледина Нина Олеговна, доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Палеев Дмитрий Юрьевич**, доктор технических наук, начальник научно-исследовательского отдела ФГКУ ДПО «Национальный аэромобильный спасательный учебно-тренировочный центр подготовки горноспасателей и шахтеров»;

**Левин Лев Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научным вопросам Горного института Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН») филиала ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук;

**Казанин Олег Иванович**, доктор технических наук, декан Горного факультета, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.11 при НИТУ «МИСиС» по адресу: 11999, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, стр. 2, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте: <http://misis.ru/science/dissertations/2018/3377/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.132.11

доктор технических наук, профессор



Е.Ю. Куликова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования и степень её разработанности.**

Повышение уровня опасности ведения горных работ обусловлено 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 шахт. 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 отдельные выработки (тоннели, шахтные стволы, квершлагги, штреки, очистные выработки), так и выемочные участки или шахтные системы в целом. В отличие от большинства других производств, характеристики всех указанных объектов в горном деле постоянно изменяются во времени и пространстве в изменяющихся горно-геологических условиях, и поэтому отличаются высокой динамикой.

Системное проектирование вентиляции горных предприятий направлено на то, чтобы на основе результатов моделирования процессов тепломассопереноса исследовать динамику определяющих факторов функционирования объекта во всём диапазоне их возможных изменений, включая и аварийные ситуации. Возможности современных информационных технологий позволяют принимать обоснованные решения задач эффективного и безопасного функционирования горных объектов на протяжении всего срока их строительства и эксплуатации.

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

**Цель работы** – разработать 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.

#### **Методы исследования**

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

#### **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 объектах подземного строительства.

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Система вентиляции горных предприятий представляет собой мультисплит-систему, проектирование которой должно осуществляться на основе разработанного алгоритма, учитывающего 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, уравнения движения многокомпонентной газовой 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 фактических параметров состояния рудничной атмосферы. 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 обеспечивать повышение качества 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 расчёта параметров шахтной вентиляции, заключается в системном рассмотрении процессов рудничной аэрогазодинамики в 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 их протекание в широком диапазоне основных влияющих факторов (параметров), изменяющихся во времени и пространстве, а также оптимизировать управление этими процессами.

**Теоретическое значение исследований** заключается: в развитии методов проектирования систем проветривания подземных горных предприятий с использованием современных информационных технологий, позволяющих реализовать системный подход на стадиях проектирования и эксплуатации в оперативном режиме, в том числе в нештатных ситуациях; в обосновании принципов системного проектирования; в разработке модели термоаэрогазодинамических процессов, протекающих в горных выработках, 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 проветривания горных предприятий и управления термоаэрогазодинамическими процессами в горных выработках; в разработке предложений по созданию единой базы исходных данных для проектирования вентиляции 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 реальным условиям в горных выработках.

**Апробация работы.** 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.), в международной молодежной научной школе «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, РАН ИПКОН РАН, 2012, 2014, 2015 гг.), на международной конференции «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.), на 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», 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. 241/11/16)1, Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 2014/113 проект № 36, №14.B37.21.0655, АОТ-908ДС), а также хоздоговорных работ с предприятиями АО «СУЭК», ООО ««Тиссен Шахтбау ГмбХ» (Германия)» и ГУП «Москоллектор».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 55 печатных работ, в том числе 6 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, 19 статей в изданиях, входящих в перечень рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, 1 монография, 1 авторское свидетельство.

**Объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения, содержит 103 рисунка и 25 таблиц, список использованных источников из 366 наименований.

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., а также сотрудникам ФГУП ВГСЧ России А.Ф. Перцеву и Д.А. Фёдорову, сотрудникам Ростехнадзора С.Н. Подображену и Т.В. Стульской, и всем сотрудникам кафедры «Безопасность и экология горного производства» Московского горного института.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Объектом диссертационного исследования являются подземные горнодобывающие и горностроительные предприятия. Сегодня подземную добычу полезных ископаемых ведут по всей территории России. С увеличением глубины разработки усложняются условия, в которых ведутся работы. Особенности горно-геологических условий месторождений обуславливают выбор схем, способа и средств проветривания.

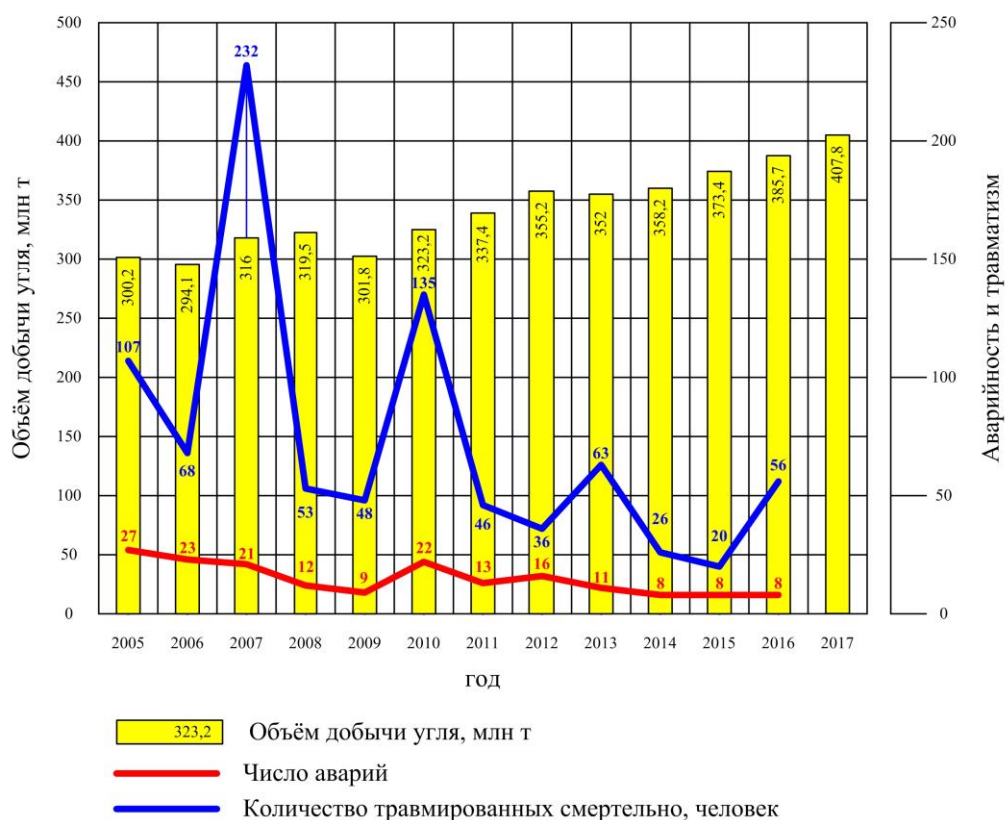
Наибольшее количество аварий по аэрологическому фактору происходит на угольных шахтах. На рисунке 1 показано, что в целом число аварий сокращается, при возрастании добычи угля. Но, как видно из графика, крупные катастрофические аварии, связанные с аэрологическими факторами, происходят регулярно раз в три года. Это, в первую очередь, говорит о системных ошибках в нормативной и методической базе, используемой для проектирования вентиляции горных предприятий.

Аварии, связанные с аэрологическими факторами, на горных предприятиях, разрабатывающие рудные месторождения, происходят редко. 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.

Действующая нормативная база не даёт чётких методов и способов обоснования технико-технологических решений, касающихся вентиляционных

систем горных предприятий. Не регламентирован порядок осуществления научно-методического сопровождения горных предприятий по текущим вопросам проектирования систем проветривания, необходимое в сложившихся условиях.

Научно-технический прогресс привёл к тому, что существенно вырос уровень применяемых технологий в области расчётов вентиляции горных предприятий, программного обеспечения, систем аэрогазового контроля, технических характеристик источников тяги и других вентиляционных устройств. Однако применяемое программное обеспечение и более совершенная техника не способствуют снижению аэрологических рисков на горных предприятиях, ведущих подземную добычу полезных ископаемых. Это связано с тем, что информатизация и компьютеризация, применяемые в расчёте воздухораспределения, аэрогазового контроля и управления проветриванием, не затрагивают методологию проектирования.



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

Большой вклад в развитие 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, Н.И. Устинов. Проектированию вентиляции были посвящены работы академиков РАН А.А. Скочинского, А.Н. Щербаня, чл.-корр. РАН Л.А. Пучкова, докторов технических наук: Ф.А. Абрамова, Н.З. Битколова, А.Д. Вассермана, С.Г. Гендлера, В.И. Дрёмова, Ю.Д. Дядькина, Б.П. Казакова, С.П. Казакова, Н.О. Калединой, Г.В. Калабина, Н.М. Качурина, Б.Ф. Кирина, Ф.С. Клебанова, Е.А. Колесниченко, И.Е. Колесниченко, В.А. Колмакова, В.Б. Комарова, А.Е. Красноштейна, А.И. Ксенофонтовой, А.С. Курилко, Л.Ю. Левина, Н.И. Линденау, Н.Г. Матвиенко, И.И. Медведева, А.Ф. Милетича, П.И. Мустеля, А.А. Мясникова, Д.Ю. Палеева, М.А. Патрушева, Г.А. Радченко, Е.И. Рогова, И.В. Сергеева, Э.М. Соколова, Б.Г. Тарасова, Р.Б. Тяна, К.З. Ушакова, В.К. Ушакова, Л.А. Шевченко, Ю.В. Шувалова, С.В. Цоя, М.А. Фролова и др.

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 горном массиве при ведении горных работ. 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.

Анализ применяемых методик для описания сложных аэрогазотермодинамических процессов показал, что в них чаще используются эмпирические зависимости или упрощённые формулы физических законов с допущениями, которые дают большую погрешность при использовании их в расчётах.

Большая часть расчётов по вентиляции производится по эмпирическим формулам, не имеющим физического смысла, отображающим устойчивые статистические связи между рядом взаимовлияющих факторов, в том диапазоне, для которого набирались статистические 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.

Методики расчёта необходимого и достаточного количества воздуха по газам, образующимся в результате ведения взрывных работ, не учитывают тип взрывчатых веществ, свойства горных пород, в которых производится взрывание, свойства грунтовых вод, а также технологические особенности ведения взрывных работ. Отсутствуют методики расчёта и прогноза естественной тяги при проектировании вентиляции, тогда как в изменяющихся горно-геологических и технологических условиях влияние естественной тяги существенно, особенно для строящихся объектов. Влияние термовлажностного режима на процесс проветривания действующими методиками проектирования не учитывается. Потери статического напора при движении воздуха по горным выработкам определяются по эмпирическим формулам с коэффициентами сопротивления, также полученными опытным путём более полувека назад для конкретных условий, не соответствующих современным.

При расчётах вентиляции подземных объектов рассматривают рудничную атмосферу как некий объём с постоянной плотностью, не учитывая что плотность воздуха существенно возрастает с глубиной и, уже начиная с 500 м, её изменение вносит серьёзные погрешности в результаты расчётов.

При проветривании идут процессы изменения давления, диффузии, перемешивания различных газов, вытеснения, внутреннего трения, а также тепловые процессы. То есть параметры газового состояния при математическом описании вышеуказанных процессов необходимо рассматривать в их взаимосвязи.

Отмеченные недостатки требуют создания нового подхода к разработке проектов вентиляции подземных объектов как при строительстве, так и при их эксплуатации.

Выполненный анализ литературных источников, производственной документации и статистической отчётности позволяет сделать вывод, что нормативная и методическая базы проектирования вентиляции шахт устарели и не соответствуют современным условиям производства. 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.

Высокая динамика изменения горно-геологических условий при интенсивном ведении горных работ делает нецелесообразным уточнение и обновление эмпирических методик для расчёта параметров шахтных вентиляционных систем. Более точные решения можно получать на базе моделирования аэрогазотермодинамических процессов, протекающих в рудничной атмосфере.

Для создания математической модели в основу описания шахтных аэрогазотермодинамических процессов положена гипотеза, что движение воздуха при проветривании есть следствие выравнивания количества молекул в единице объёма. С ростом давления увеличивается количество молекул, содержащихся в единице объёма. Это приводит к снятию ранее вводимого допущения о неизменяемой плотности воздуха. 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.

Предложенное математическое описание процессов проветривания горных предприятий основано на молекулярной кинетической теории газов. В детальной проработке это позволяет избежать применения эмпирических формул и коэффициентов. Данная теоретическая база может использоваться для расчёта проветривания любых типов горных объектов, что позволяет создать единую базу системного проектирования вентиляции горных предприятий.

В основе математической модели процесса проветривания горных выработок лежат:

- уравнения диффузионного движения газов;
- описание внутреннего и внешнего трения;
- описание теплопроводности;
- уравнение диффузии.

Уравнение диффузионного движения в двухкомпонентной смеси:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 \frac{da_1}{dt} + \frac{\partial p_1}{\partial x} &= q \cdot A_1 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (a_2 - a_1) + \rho_1 X \\ \rho_1 \frac{db_1}{dt} + \frac{\partial p_1}{\partial y} &= q \cdot A_1 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (b_2 - b_1) + \rho_1 Y \\ \rho_1 \frac{dc_1}{dt} + \frac{\partial p_1}{\partial z} &= q \cdot A_1 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (c_2 - c_1) + \rho_1 Z \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газа;  $X, Y, Z$  – слагающие ускорения, производимого внешними силами в точке  $(x, y, z)$ ;  $a, b, c$  – слагающие скорости центра тяжести всех молекул, находящихся в данный момент в одном элементе объёма с рассматриваемой молекулой;  $A_1$  – некоторый постоянный коэффициент, зависящий от природы газов;  $p_1$  – давлений газов (все единицы измерения в СИ).

Потери энергии потока, обусловленные аэродинамическим трением, состоят из потерь на внутреннее и внешнее трение. На протяжении единицы рассматриваемой поверхности происходит в единицу времени уменьшение количества общего поступательного движения, равное

$$\frac{1}{4} \cdot N \cdot \Omega \cdot \beta \cdot m \cdot u = \frac{1}{4} \cdot \Omega \cdot \beta \cdot \rho \cdot u, \quad (2)$$

где  $N$  – число молекул в единице объёма;  $\Omega$  – среднеарифметическая молекулярная скорость в покое газе;  $\beta$  – постоянный для данной твёрдой поверхности коэффициент, величина которого должна лежать между 0 и 2;  $m$  – масса молекулы;  $u$  – скорость молекулы.

Это и есть величина внешнего трения. Величина, равная

$$\delta = \frac{1}{4} \cdot \Omega \cdot \beta \cdot \rho, \quad (3)$$

является коэффициентом внешнего трения.

Внутреннее трение определяется по формуле

$$F = \frac{1}{3} m \cdot N \cdot u \cdot L \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (4)$$

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

$$F = \eta \cdot \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (5)$$

получим формулу для определения постоянного коэффициента внутреннего трения для газов  $\eta$

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot m \cdot N \cdot u \cdot L = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot u \cdot L, \quad (6)$$

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

Температура может влиять на среднюю длину пути свободного пробега молекул в рассматриваемом газе ( $L$ ) и на среднеарифметическую молекулярную скорость ( $\Omega$ ). Среднеарифметическая молекулярная скорость прямо пропорциональна квадратному корню из температуры, а  $L$  возрастает с температурой за счёт увеличения импульса соударяющихся молекул в газовой среде. Согласно результатам опытов А. Обермейера можно получить добавочное значение к коэффициенту внутреннего трения

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)^n, \quad (7)$$

где  $\eta_0$  – 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.

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

$$G = \frac{1}{4} \xi \cdot N \cdot J \cdot \overline{V^3} \mu \cdot d\mu, \quad (8)$$

где  $V$  – среднеарифметическое значение скоростей молекул;  $\mu$  – косинус угла, образованного направлением вектора скорости молекулы с осью;  $J$  – механический эквивалент теплоты.

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. Теоретического обоснования выбора длины в 10 м в литературе не встречается. Основное уравнение, с достаточной полнотой учитывающее большое количество параметров, может быть представлено в виде

$$D = \frac{3}{4 \cdot \pi \cdot \psi_{12}^2} \cdot \frac{\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}}{m_1 + m_2} \cdot \frac{p_0^2}{d_1 \cdot d_2} \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{p}, \quad (9)$$

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.



Математическая модель, основанная на кинетической теории газов, позволяет на более детальном уровне изучать процессы тепломассопереноса в горных выработках. В результате её использования становится возможным описать явления противотока в горной выработке, возникающие при разных плотностях воздуха. Также можно учесть физические свойства газов, составляющих рудничную атмосферу. Новое представление аэродинамического сопротивления позволяет учесть все его виды и определить величину внутреннего трения.

Разработанная математическая модель должна лечь в основу системного проектирования проветривания шахт и рудников. Данная модель основана на принципах математического анализа и не имеет недостатков эмпирических методик, но она в настоящее время не представлена в имеющихся программных средствах, позволяющих проводить трёхмерное моделирование. Программные комплексы других отраслей промышленности позволяют использовать уравнения Навье-Стокса, осреднённые по Рейнольдсу. Эффективность их применения для расчётов проветривания горных предприятий доказана, хотя при этом требуются дополнительные исследования для описания краевых условий, поэтому они также могут быть положены в основу методологии системного проектирования вентиляции шахт.

Под системным проектированием вентиляции понимается методологический подход, учитывающий взаимосвязи внешних и внутренних разнородных факторов, влияющих на процессы проветривания горных выработок. Внутренние факторы – это те, которые поступают или выделяются в горных выработках, начиная от устья вскрывающих выработок (параметры диффузии, химические реакции, внутреннее и внешнее 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.).

Проветривание горных предприятий рассматривается как «система в системе» – вентиляционная система и её взаимосвязи с горно-технологической системой. Проектирование вентиляции шахт и рудников, как и системное проектирование в целом, комплексно решает поставленные задачи: принимает во внимание взаимодействие и взаимосвязи отдельных объектов-систем и их частей, как между

собой, так и с внешней средой; учитывает социальные, экономические и экологические последствия их функционирования; предусматривает рассмотрение объекта проектирования как совокупность протекающих в нём процессов. Разработанная методология системного проектирования вентиляции горных предприятий включает: принципы, порядок, формирование базы исходных данных, модели и алгоритмы.

Основа системного проектирования вентиляции горных предприятий – виртуальный аналог подземной аэрогазодинамической системы. Он включает в себя трёхмерную геометрическую модель проектируемого объекта (статическая и динамическая структуры, формирующие границы протекания аэрогазодинамических процессов), математическую модель (фундаментальные законы физики, описывающие процессы тепломассопереноса) и краевые условия. Виртуальный аналог позволяет с высокой точностью проводить расчёты по всему рассматриваемому объёму, визуализировать распределение давлений, скоростей и концентраций вредных и опасных примесей в пространстве горных выработок и в выработанном пространстве. Созданные виртуальные аналоги на этапе проектирования нового предприятия используются также в период эксплуатации.

При системном подходе первоначально проектирование ведут от общего к частному, имея в виду цель – обеспечение безопасности ведения горных работ по аэрологическому фактору. Определив общую структуру системы - схему и способ проветривания горного предприятия, - переходят к частным задачам: выбору способов управления газовыделением, 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 рисунке 2.

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



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, задача которых – поддержание моделей виртуальных аналогов предприятий, т.е. корректировка моделей в процессе ведения горных работ и оперативное планирование (текущее проектирование согласно развитию 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 шахте в целом (схематично показано на рисунке 3).

Алгоритм системного проектирования в разработанной методологии 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 в процессе ведения горных работ в качестве реакции на данное событие происходит корректировка исходных данных, расчётов и самого проекта проветривания (рисунок 4).

По времени системное проектирование разделяется 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 м от поверхности) и до завершения добычи полезных ископаемых с последующей ликвидацией. Алгоритм системного проектирования вентиляции при этом остаётся одинаковым.

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 технико-экономического сравнения вариантов обеспечивающих требуемый уровень безопасности.

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 достоверность информации при поддержании модели (виртуального аналога) с учётом топологии сети отвечают все службы горного предприятия: геологические, технологические, экономические и др. Маркшейдерской службой предоставляется информация для пополнения и корректировки в графических компьютерных программах (например, AutoCAD или Компас – 3D) трёхмерных геометрических моделей горного предприятия. Проектным отделом, занимающимся вопросами вентиляции, осуществляется сбор информации от производственных служб и подготовка исходных данных для системного проектирования.

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 (управляющую компанию). Это позволит выполнять проектные работы в процессе эксплуатации шахты или рудника, оперативно внедрять и на законодательном уровне обосновывать новые решения по технологии и безопасности ведения горных работ.

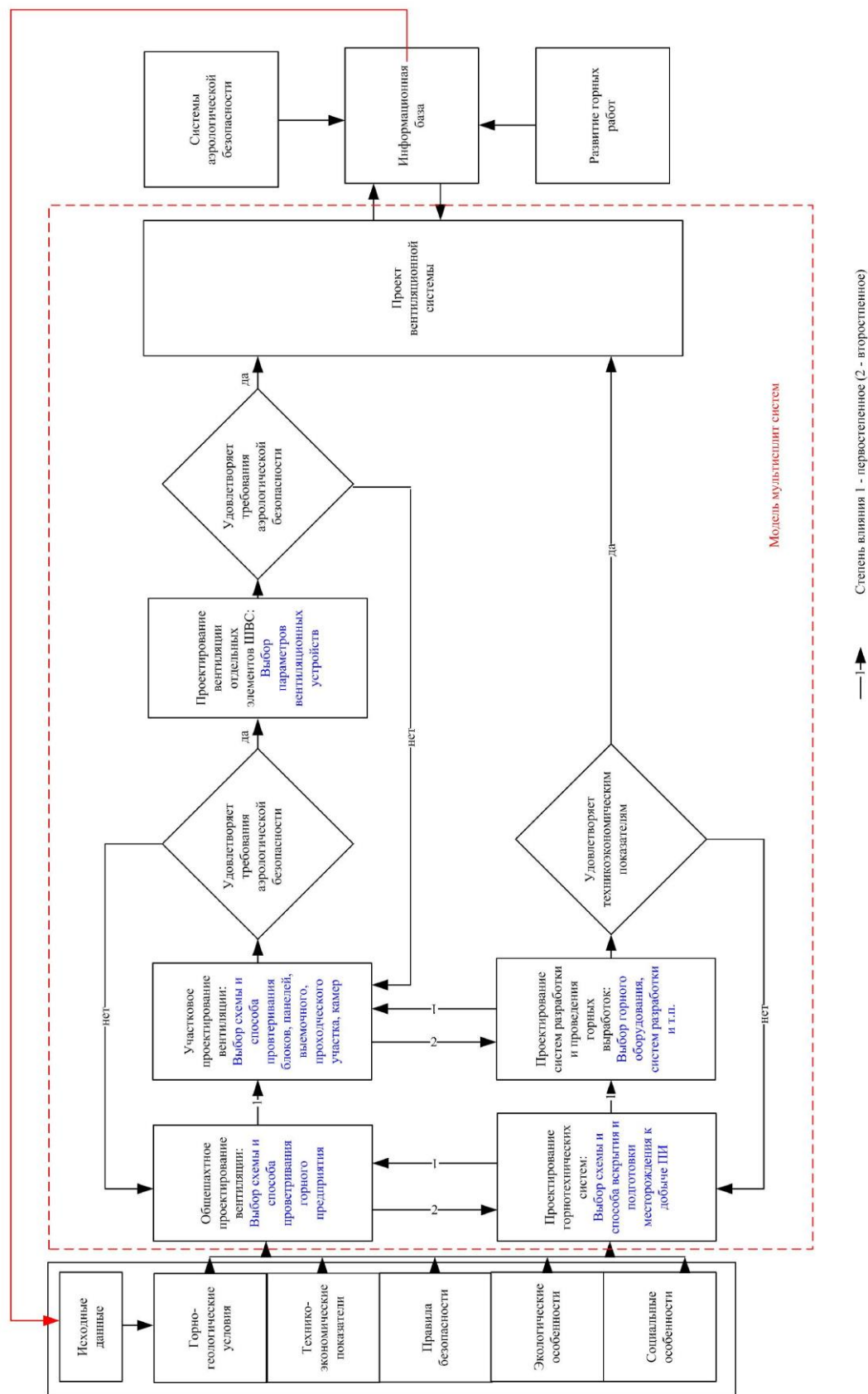


Рисунок 3 – Системное проектирование вентиляции во взаимосвязи с горнотехнической системой

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 контролю производственного микроклимата и др.

Применение системного проектирования вентиляции горных предприятий и вычислительных средств даёт 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, температур, скоростей, давления и т.д.), что позволит выявить «узкие места» в проектируемой системе.

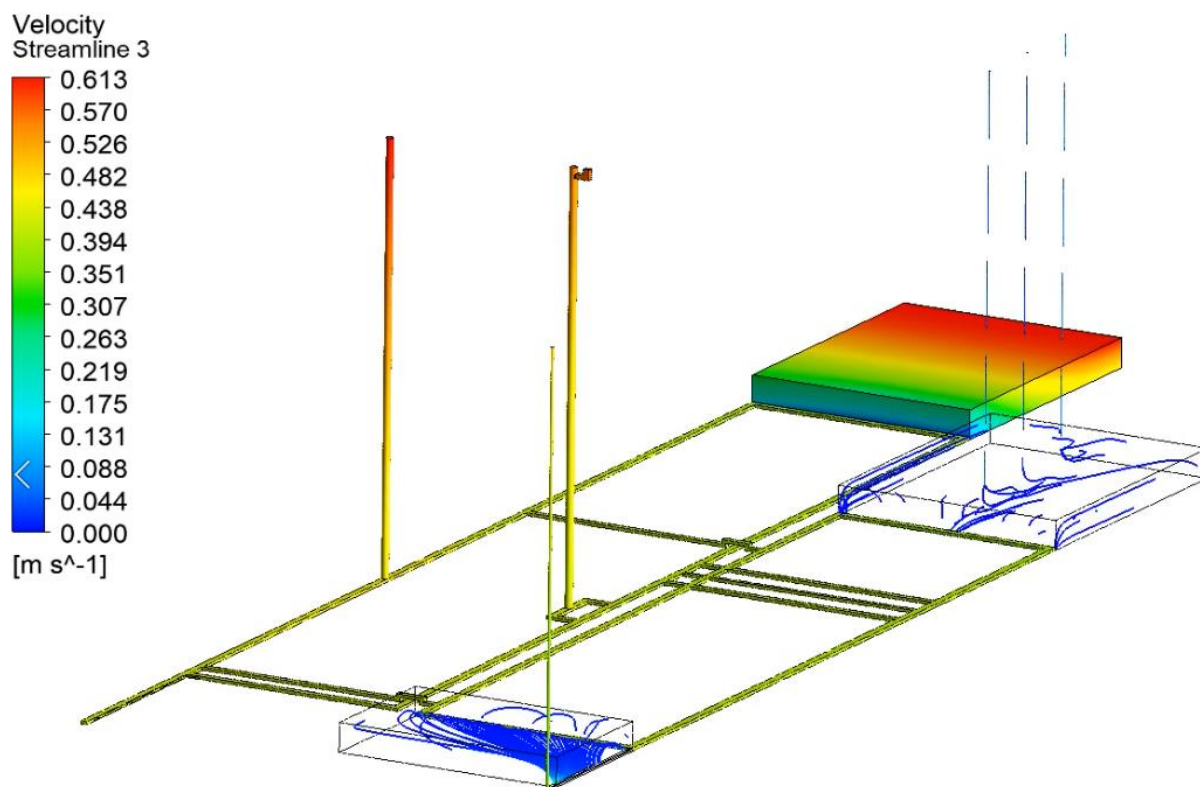
Сочетание всех преимуществ позволяет выбрать оптимальный вариант из получаемых альтернативных решений.

Апробация разработанной методологии проводилась для различных объектов, расположенных в различных регионах, занимающихся добычей, строительством и эксплуатацией подземных сооружений.





Для анализа возможности решения задачи проектирования сложных систем проветривания была создана трёхмерная модель угольной шахты с различными источниками тяги (рисунок 5). В задаче проводилось численное определение параметров проветривания (распределения скоростей движения воздуха и давления) в горных, газодренажных выработках и в выработанном пространстве. По линиям тока в выработанном пространстве можно определить фильтрационные скорости и зоны, в которых может образоваться скопление газа.



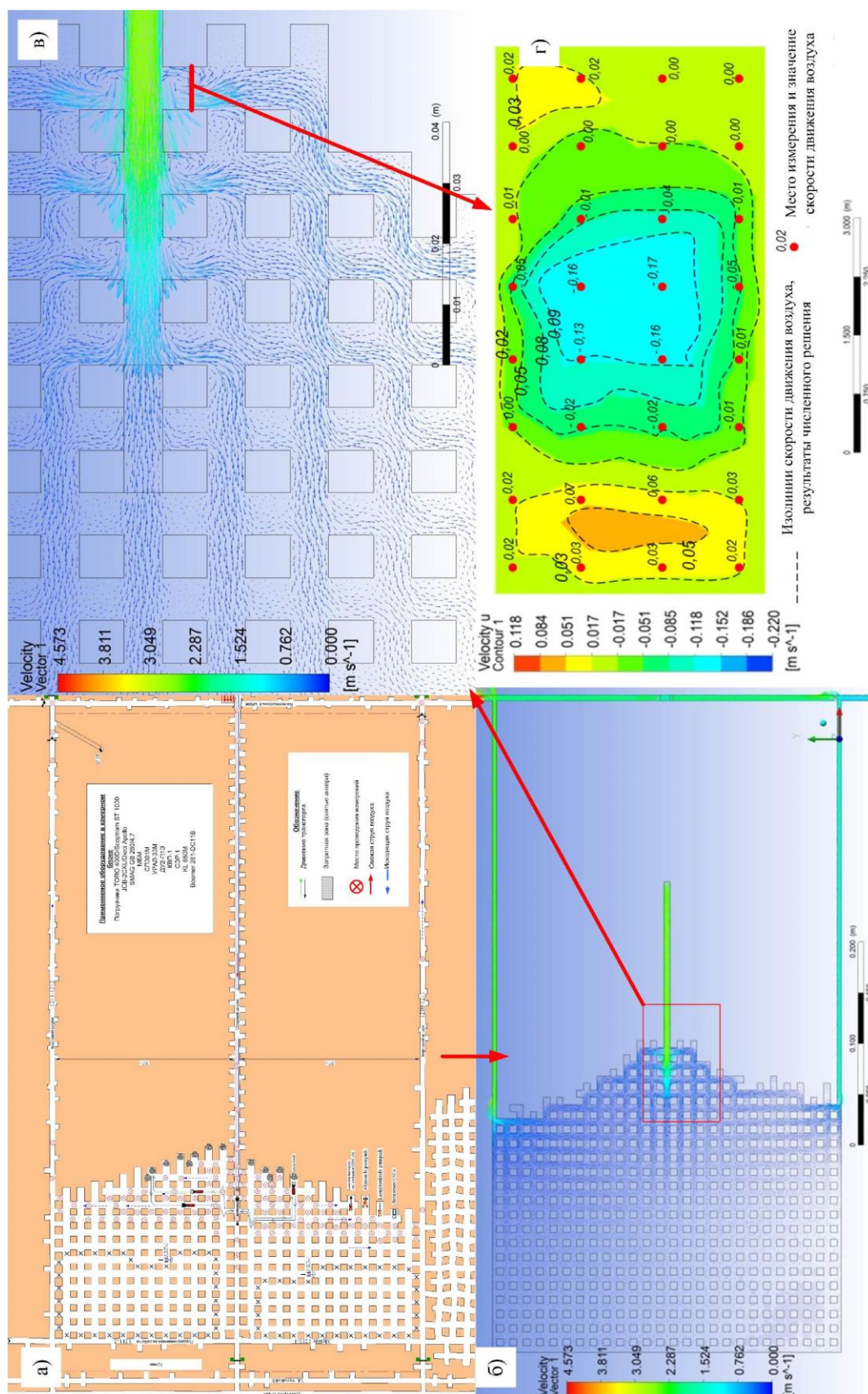
**Рисунок 5 – Результаты численного расчёта распределения давления по поверхности горных выработок и изолинии скорости движения воздуха по шахте с учётом работы ГВУ, дегазации и ГОУ**

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). 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%. 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. По результатам системного проектирования 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, используемых при проектировании новых камерных блоков, что позволило перераспределить воздух в соответствии с потребностями в нём.

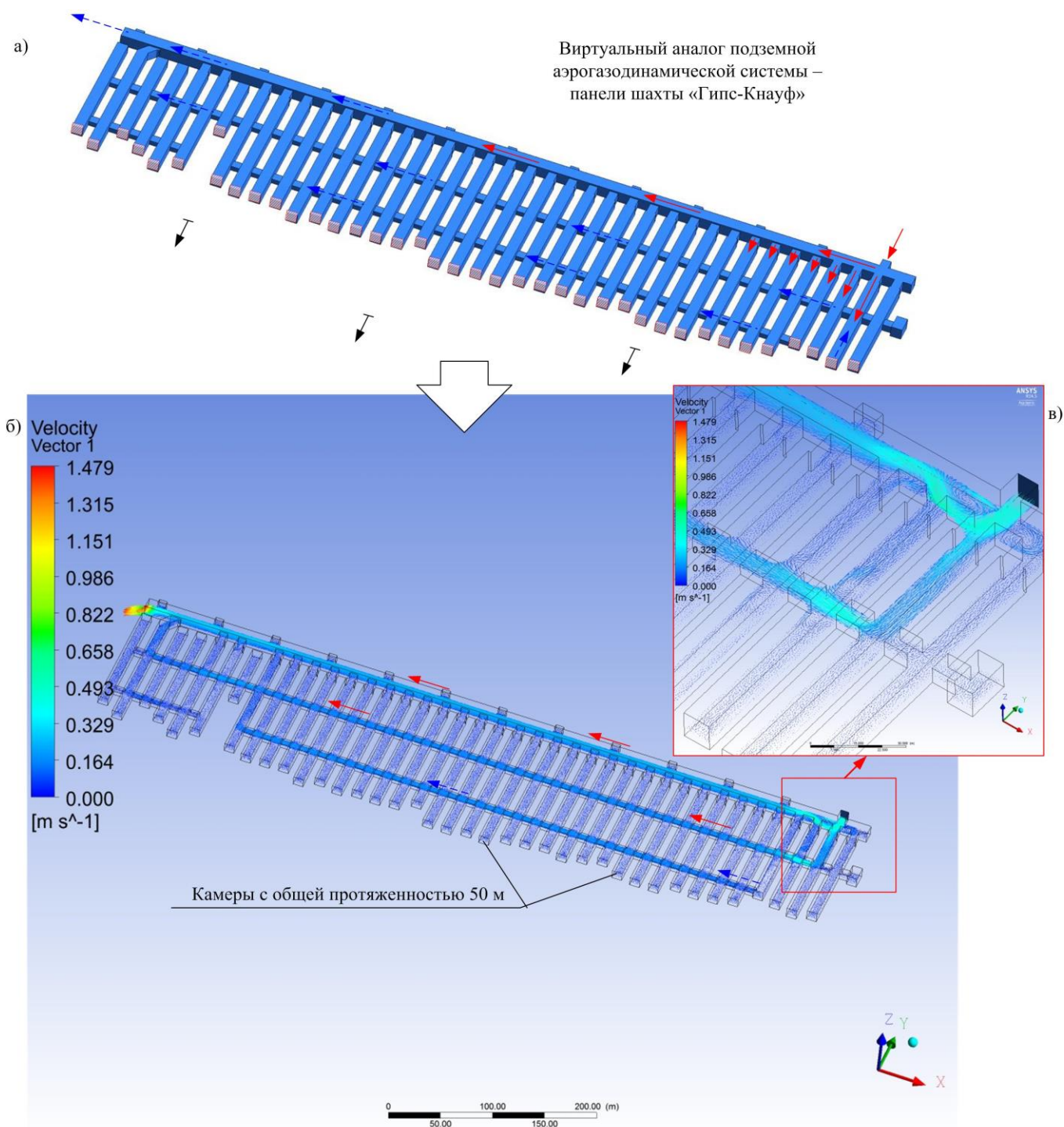
Проектирование процессов проветривания производилось для условий шахты «Гипс-Кнауф», применяющей камерно-столбовую систему разработки. Принятая система разработки усложняет схему проветривания панелей. Были проведены расчёты существующего режима проветривания, результаты которых приведены на рисунке 7. По векторам скорости в 50-метровых добычных камерах отчётливо видно отсутствие движения воздуха. Динамическое моделирование показало, что применение пульсирующей вентиляции для увеличения турбулизации вентиляционного потока обеспечивает эффективное проветривание камер.

Полностью по всем стадиям разработанная методология была апробированна на объектах подземного строительства двух стволов шахты «Глубокая» рудника «Скалистый» – Вентиляционный ствол №10 (ВС-10) и Скиповой ствол №1 (СКС-1). Исследования проводились в период 2014 – 2017 гг. Основой системного проектирования стали разработанный ранее проект проветривания, технологические решения, принятые при строительстве стволов, характеристики горно-геологических и климатических условий. В результате проведённого комплекса работ по научно-методическому сопровождению ведения и развития горно-строительных работ были разработаны и внедрены технологические решения по системному проектированию вентиляции. Работы включали выработку решений на всех трёх уровнях.



**Рисунок 6 – 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**





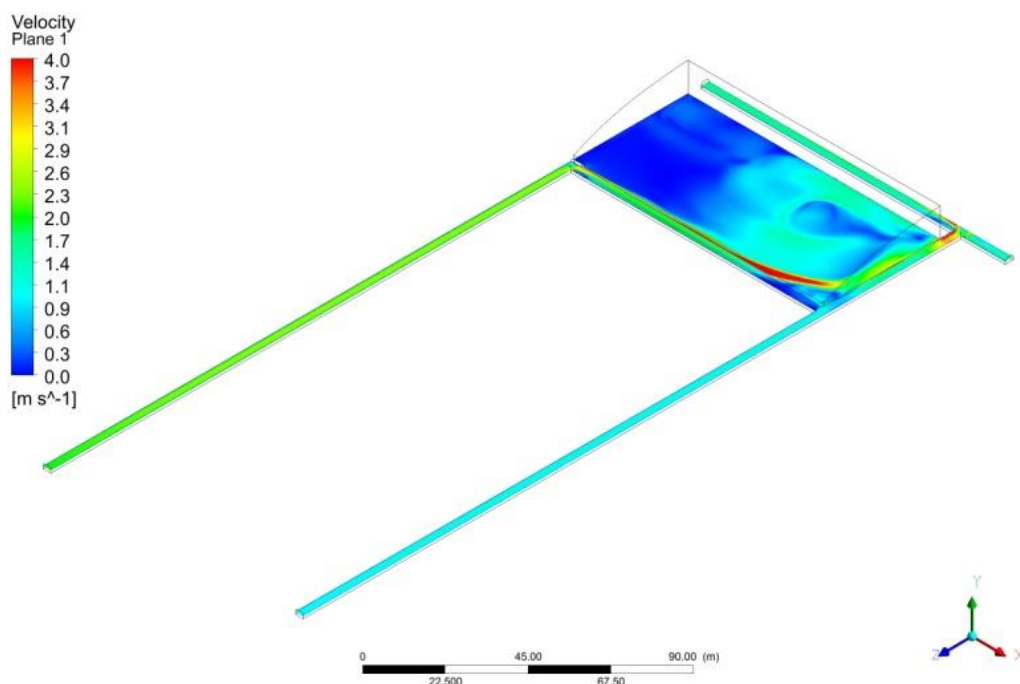
**Рисунок 7 –Виртуальный аналог и результаты численного расчёта процесса проветривания панели шахты «Гипс-Кнауф»: а) виртуальный аналог камерного блока; б) результаты расчёта в виде векторов скорости движения воздуха; в) укрупнённый фрагмент результатов расчёта**

На уровне общешахтного проектирования вентиляции произведён учёт естественной тяги при выборе режимов и схем проветривания ствола. На уровне «Участкового проектирования проветривания» получены и внедрены решения по схемам и способам проветривания призабойной части ствола и комплексов выработок

околоствольных дворов. Рассчитаны параметры вентиляционных устройств, позволяющие обеспечить повышение уровня безопасности ведения горных работ по аэрологическому фактору.

Проведенные исследования по улучшению проветривания коммуникационных коллекторов г. Москвы с применением разработанной методологии позволили разработать внутренний стандарт организации «Проектирование системы отопления, вентиляции и кондиционирования в коммуникационных коллекторах».

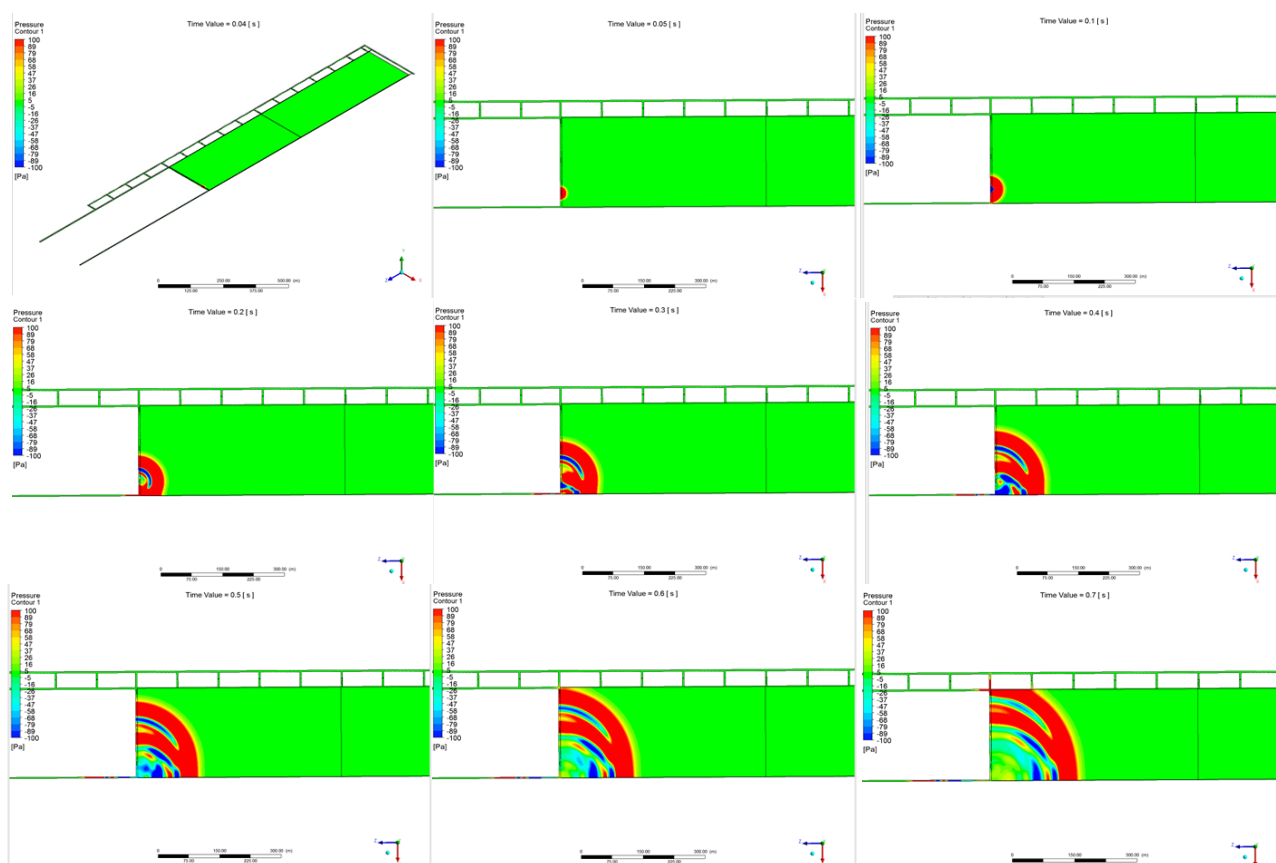
Методология применима в полной мере к аварийным ситуациям, связанным с аэрологическими факторами. На основе разработанных виртуальных аналогов выемочных участков угольных шахт возможно проводить оценку эндогенной пожароопасности выработанных пространств. Также можно определять места локализации возможных очагов пожаров и выноса утечек с пожарными газами (рисунок 8). Результаты проектирования нештатных ситуаций позволяют разработать мероприятия по спасению горнорабочих и обеспечению безопасности горноспасателей при ведении работ по локализации и ликвидации последствий аварий.



**Рисунок 8 – Визуализация распределения скорости движения воздуха в выработанном пространстве выемочного участка и мест выноса утечек воздуха на газодренажном штреке**

На основе трёхмерного компьютерного моделирования и сформулированных принципов системного проектирования, в дополнение к имеющимся способам расчёта параметров взрыва, предлагается новый способ расчёта распространения ударно-воздушной волны (УВВ). Результаты расчёта могут быть представлены в виде видеороликов, кадров по времени (распределения УВВ по произвольному сечению, рисунок 9), в графическом виде, табличном и т.д. Данный способ расчёта и визуализации 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, а также наложение нескольких волн.

Проведённые верификационные исследования показали, что при развитии данного направления моделирование может быть использовано в экспертных целях и при тактических инженерных расчётах по горноспасательным работам.



**Рисунок 9 – Пример графического представления результатов расчёта распространения УВВ**

Проводимые научные исследования в рамках создания методологических основ системного проектирования вентиляции шахт при использовании разработанных подходов, алгоритма и принципов построения моделей – виртуальных аналогов аэрогазодинамических систем – в перспективе могут быть использованы для создания новых вентиляционных устройств. Сегодня современные технологии проектирования позволяют создавать вентиляторы под заданный диапазон параметров: таких как депрессия, расход воздуха и потребляемая мощность. В основе данной технологии лежит трёхмерное моделирование статических и динамических процессов, протекающих как в самом устройстве, так и в окружающей его среде.

Таким образом разработанная методология предусматривает возможности для решения широкого круга задач рудничной вентиляции.

## **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 экологическими 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 виртуальных аналогов подземных аэрогазодинамических систем.

3. Предложенная методология системного проектирования вентиляции шахт базируется на общепринятом в настоящее время «классическом» проектировании проветривания горных предприятий и дополнена новым подходом к проведению 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 при эксплуатации предприятия.
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 позволяет 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 процессов.
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 обеспечения научного обоснования 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.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

1. Кобылкин, С.С. Определение взрывопожаробезопасных режимов проветривания шахт / Кобылкин С.С. // Монография. М.: изд. «Горная книга». – 2017. – С. 44 с.
2. Kaledina, N.O., Kobylkin, S.S., Kobylkin, A.S. The calculation method to ensure safe parameters of ventilation conditions of goaf in coal mines / N.O. Kaledina, S.S. Kobylkin, A.S. Kobylkin // «Eurasian Mining». – 2016. – №1. – pp. 41-44.
3. Пучков, Л.А., Каледина, Н.О. Кобылкин, С.С. Глобальное энергетическое потребление: прогнозы и реальность / Л.А. Пучков, Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин // Горный журнал. – 2016. – №1. – С. 4-6.
4. Puchkov, L.A., Kaledina, N.O., Kobylkin, S.S. Systemic approach to reducing methane explosion hazard in coal mines / L.A. Puchkov, N.O. Kaledina, S.S. Kobylkin // «Eurasian Mining». – 2015. – №2. – pp. 3-6.
5. Kaledina, N.O. Kobylkin, S.S. Ventilation of blind roadways in coal mines: problems and solutions / N.O. Kaledina, S.S. Kobylkin // «Eurasian Mining». – 2015. – №2. – pp. 26-30.
6. Пучков, Л.А., Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Системные решения обеспечения метанобезопасности угольных шахт / Л.А. Пучков, Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 12-16.

7. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. О выборе способа проветривания тупиковых горных выработок газообильных угольных шахт / Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин // Горный журнал. – 2014. – № 12. – С. 99-103.
8. Пучков, Л.А., Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С., и др. Локальное формирование параметров вентиляции, подлежащих контролю при автоматизации проветривания / Л.А. Пучков, Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин, А.С. Кобылкин, О.В. Смирнов // Уголь. – 2015. – № 11. С. 58-61.
9. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Моделирование процессов вентиляции шахт для обеспечения метанобезопасности горных работ / Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин // Горный журнал. – 2011. – № 7. – С. 101-103.
10. Кобылкин, С.С. Применение кинетической теории газов при описании процессов проветривания горных предприятий / Кобылкин С.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017 г. – № 12, S42. – 12 с.
11. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С., Мещеряков, Д.А. Новый способ расчета параметров ударно-воздушных волн в шахтах / С.С. Кобылкин, А.С. Кобылкин, Д.А. Мещеряков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S12. – С. 22-26.
12. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Системное проектирование вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических систем / Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № S1. – С. 282-294.
13. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С., Мещеряков, Д.А., Гашенко, О.И. Сравнительная оценка приборов, используемых для проведения депрессионных съемок / Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин, Д.А. Мещеряков, О.И. Гашенко // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 3. – С. 50-52.
14. 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 / А.С. Кобылкин, С.С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 12. – С. 225-229.
15. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Расчёт необходимого количества воздуха для шахт и рудников по наибольшему количеству людей / С.С. Кобылкин, А.С.

- Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 5. – С. 209-217.
16. Кобылкин, С.С. Влияние перепадов давления при проветривании на состояние здоровья работающего персонала / С.С. Кобылкин // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – С. 49-52.
  17. Кобылкин, С.С. Системное проектирование вентиляции горных предприятий / Кобылкин С.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015 г. – № S1. – С. 150-157.
  18. Кобылкин, С.С. Требования к системному проектированию вентиляции шахт и рудников / Кобылкин С.С. // Научно-технический и методический журнал Рациональное освоение недр. – 2013. – № 2. – С. 56-59.
  19. Пучков, Л.А., Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Методология системного проектирования вентиляции шахт / Л.А. Пучков, Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № S1. – С. 128-137.
  20. Пучков, Л.А., Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Аэродинамический метод предупреждения эндогенной пожароопасности выработанных пространств угольных шахт / Л.А. Пучков, Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 12. – С. 307-311.
  21. Кобылкин, А.С., Кобылкин, С.С. Исследование движения воздуха через неоднородную пористую среду / А.С. Кобылкин, С.С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 8. – С. 224-227.
  22. Каледина, Н.О., Кобылкин, А.С., Кобылкин, С.С. Моделирование пульсирующего проветривания горных выработок / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7, тем. пр. «Метан. Аэрология. Безопасность». – С. 449-453.
  23. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С. Объемное моделирование, как метод исследования и управления термо- и аэрогазодинамическими процессами на горных предприятиях / Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № S1. – С. 149-156.

24. Кобылкин, А.С., Кобылкин, С.С. Перспективы разработки технологий пульсирующей вентиляции при ведении горных предприятий / А.С. Кобылкин, С.С. Кобылкин // Горная техника. – 2013 – № 2 (12). – С. 14-16.
25. 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.
26. Азбель, М.Д., Кобылкин, С.С. Многофункциональные системы безопасности угольных шахт / Азбель М.Д., Кобылкин С.С.// Горная техника. – 2013. – 1 (11). – С. 52-55.
27. 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.
28. 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.: Изд. «Горное дело» ООО «Киммерийский центр». 2013. – С. 54-59.
29. Кобылкин, А.С., Кобылкин, С.С. Распределение пыли различного дисперсионного состава в горных выработках / А.С. Кобылкин, С.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. – 392 с.
30. 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.

31. Кобылкин, А.С., Кобылкин, С.С. Газовыделение 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.
32. 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.
33. Кобылкин, С.С. Инновационное решение в проектировании вентиляции угольных шахт и рудников / С.С. Кобылкин // Горная техника. – 2012. – № 2 (10). – С. 20-23.
34. 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.
35. 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.
36. 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.

37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Влияние естественной тяги на безопасность ведения горных работ / С.С. Кобылкин, А.С. Кобылкин // 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.
41. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Вопросы нормирования и измерения теплового режима шахт и рудников / С.С. Кобылкин, А.С. Кобылкин // 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.
42. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Обзор программного обеспечения в области проектирования вентиляции шахт и рудников с точки зрения эндогенной пожароопасности / С.С. Кобылкин, А.С. Кобылкин // В сборнике: Проблемы

освоения недр в XXI веке глазами молодых Материалы 13-ой Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – 2016. – С. 241-243.

43. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Проблемы проветривания глубоких стволов при ведении взрывных работ / С.С. Кобылкин, А.С. Кобылкин // 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.
44. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Способ обнаружения эндогенных пожаров на основе компьютерного моделирования / С.С. Кобылкин, А.С. Кобылкин // 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.
45. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С. Учёт естественной тяги при системном проектировании вентиляции шахт / С.С. Кобылкин, А.С. Кобылкин // 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.
46. Кобылкин, С.С., Кобылкин, А.С., Каледин, О.С., Степанов, А.В. Новый подход при проектировании вентиляции / С.С. Кобылкин, А.С. Кобылкин, О.С. Каледин, А.В. Степанов // Горная техника. – 2015 – № 1 (15). – С. 12-14.
47. 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 / С.С. Кобылкин, А.Е. Михеев, Р.А. Удалов, А.С. Кобылкин // Горная техника. – 2014 – 2 (14). – С. 52-55.
48. Кобылкин, С.С., Михеев, А.Е., Удалов, Р.А., Кобылкин, А.С., Липатов, М.В. Способ обогрева воздуха, поступающего в шахту «Эстония» / Кобылкин, С.С., А.Е. Михеев, Р.А. Удалов, А.С. Кобылкин, М.В. Липатов // Горная техника. – 2014. – № 1 (13). – С. 20-23.
49. Кобылкин, С.С., Проценко, А.В. Анализ состояния и проблем проветривания на руднике Нурказган (ТОО «Корпорация Казахмыс», Казахстан) / С.С.



Кобылкин, А.В. Проценко // 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.

50. Puchkov, L.A., Kaledina, N.O., Kobylkin, S.S. Designing of ventilation of mines as multisplit-systems / L.A. Puchkov, N.O. Kaledina, S.S. Kobylkin // 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.
51. 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.
52. Каледина, Н.О., Кобылкин, С.С., Каледни, О.С., Кобылкин, А.С. Проектирование вентиляции при строительстве подземных сооружений / Учебное пособие М.: Издательство «Горная книга». – 2016. – 78 с.: ил.
53. 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.
54. Эпштейн, С.А., Кобылкин, С.С., Минаев В.И. Методы и средства прогноза склонности углей к самовозгоранию при их добыче и хранении / С.А. Эпштейн, С.С. Кобылкин, В.И. Минаев, В.Г. Нестерова, И.М. Мейдель, Е.А. Новиков // Методические указания по проведению лабораторных работ Московский государственный горный университет. – М.: МГГУ. – 2013. – 50 с.
55. 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.

### **Личный вклад автора**

Автором проведены: анализ научной, методической и нормативной документации [3, 7, 13, 15, 16, 21, 26, 27, 29, 31, 42]; численные расчёты и эксперименты по разработанным методикам [1, 2, 4, 5, 8, 21, 28, 34]; натурные исследования на шахтах, рудниках, строящихся горных предприятиях и в городских подземных сооружениях [8, 9, 36, 37-41, 43, 47-49]. Выдвинута гипотеза описания процессов проветривания на основе кинетической теории газов [10]. Разработаны методологические основы системного проектирования, алгоритм, единая модель процессов тепломассопереноса, порядок проектирования и рекомендации по реализации [6, 12, 17-19, 23, 30, 32-35, 46, 50]. Внедрение результатов исследований в форме решения частных задач для конкретных объектов [11, 14, 20, 22, 24, 25, 44, 45, 50-55].