

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

Федоров Денис Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОБОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ
СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ШАХТНОЙ
ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ**

Специальность 2.10.3 – «Безопасность труда»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Кобылкин Сергей Сергеевич

Москва, 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Россия обладает крупнейшими мировыми запасами полезных ископаемых, спрос на которые несмотря на новые вызовы, включая санкции, экологические требования и конкуренцию – продолжит возрастать. Потребность в угле будет оставаться стабильной, даже несмотря на геополитическую ситуацию и тренд на возобновляемые источники энергии. Истощение запасов нефти и газа, а также развитие углехимии, будут способствовать будущему развитию угледобычи. Задачи по добыче редкоземельных металлов являются важнейшими во всех странах мира. Поэтому горнодобывающая промышленность продолжит динамично развиваться в XXI веке.

На всех горных предприятиях вопросы обеспечения безопасности являются приоритетными. При этом наиболее важный вопрос связан с эффективным и надежным проветриванием. В настоящее время нет действующего документа по проектированию вентиляции угольных шахт и рудников. Существовавшее ранее Руководство по проектированию вентиляции шахт, утвержденное Минуглепром СССР от 15.08.1989 года (далее – Руководство), отменено регуляторной гильотиной в 2021 году. Для рудников полноценного единого документа по проектированию вентиляции не существовало.

Даже в ранее действовавших документах некоторые параметры, влияющие на проветривание, не были достаточно изучены. Полученные ранее зависимости устарели в связи с изменением технологии ведения горных работ. В первую очередь требуют пересмотра вопросы определения величины аэродинамического сопротивления горных выработок и шахтной сети с учетом современных технологий. Существующие эмпирические коэффициенты, указанные в Руководстве и справочниках, не учитывают изменившиеся технологии, современные виды крепи и горное оборудование. Отдельно обращает на себя внимание вопрос определения и учета величины лобового

аэродинамического сопротивления. Данный вид аэродинамического сопротивления при проектировании вентиляции сегодня не учитывается и не регламентируется. При этом, при проектировании параметров горных выработок, с целью сокращения затрат на проходку и поддержание горных выработок, площадь поперечного сечения принимают минимально возможной. Высоту и ширину горных выработок определяют исходя из габаритов оборудования и требований Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности.

Величина лобового аэродинамического сопротивления неподвижного горного оборудования может быть рассчитана по известным формулам, либо определяется опытным путём через величину коэффициента лобового аэродинамического сопротивления (c). Полученная величина лобового аэродинамического сопротивления суммируется с аэродинамическим сопротивлением трения ветви, в которой данное препятствие расположено. При этом в научной литературе не описано определение лобового аэродинамического сопротивления для самоходного горного оборудования.

При движении транспорта, эксплуатируемого в горных выработках шахты, величина лобового аэродинамического сопротивления требует повышенного внимания. В данном случае дополнительное аэродинамическое сопротивление, обусловленное лобовым сопротивлением, изменяется во времени и пространстве вместе с местоположением самоходного горного оборудования. Под влиянием лобового аэродинамического сопротивления крупногабаритного оборудования может произойти перераспределение воздушных потоков по шахтной вентиляционной сети. Возможны случаи встречного или попутного направления воздушной струи и движения техники, что может приводить к нивелированию дополнительного давления или возникновению «поршневого» эффекта.

Степень разработанности темы исследований. Исследования видов аэродинамических сопротивлений в России начаты выдающимися учеными академиком А.А. Скочинским и его учеником В.Б. Комаровым. Изучение лобовых аэродинамических сопротивлений проводилось для клетей и скипов

(А.И. Ксенофонтова, И.Е. Идельчик, Т.Д. Бевз), а также при учете аэродинамического сопротивления расстрелов в стволах (В.В. Кашибадзе, А.А. Харев, В.Д. Карпухин, П.И. Мустель). Встречаются отдельные формулы по определению лобового аэродинамического сопротивления электровозов с вагонами (Ф.С. Клебанов), а также предложены зависимости, учитывающие поршневой эффект (Н.Н. Мохирев). В настоящее время вопросами аэродинамических сопротивлений занимаются такие ученые как член-корр. РАН Л.Ю. Левин, доктора наук Гендлер С.Г., Каледина Н.О., Кобылкин С.С., Семин М.А. и др.

В зарубежной литературе в области аэрологии горных предприятий нет понятия лобового аэродинамического сопротивления. Там такие объекты относят к местным аэродинамическим сопротивлениям. Вопросами аэродинамических сопротивлений в других странах занимались такие ученые как S.J. Sridharan, B.S. Sastry, H.L. Hartman, A. Stevenson, M.J. McPherson и др.

Цель работы: для повышения уровня аэрологической безопасности разработать научно обоснованные методики определения величины лобового аэродинамического сопротивления с учетом движения самоходного горного оборудования.

Идея работы заключается в разработке методик определения величины лобового аэродинамического сопротивления самоходной горной техники на основе проведения численного и натурного эксперимента с последующим учетом влияния дополнительной депрессии, обусловленной лобовым сопротивлением, на воздухораспределение в шахтной вентиляционной сети.

Объектом исследований данной диссертационной работы являются свойства шахтных вентиляционных сетей.

Предметом исследований - лобовые аэродинамические сопротивления, формирующиеся при движении самоходного горного оборудования.

Основные задачи исследования:

- 1) провести анализ состояния проветривания шахт и рудников Российской Федерации;
- 2) выполнить анализ существующих исследований в области аэродинамики вентиляционных потоков в горных выработках в части, касающейся определения величины лобового сопротивления;
- 3) исследовать влияние скорости движения самоходного горного оборудования, перекрытия сечений горных выработок, параметров воздушного потока (скорости, давления и направления относительно движения машин) на величину лобового сопротивления;
- 4) разработать и апробировать методику расчёта величины лобового аэродинамического сопротивления при проектировании вентиляции горных предприятий;
- 5) разработать рекомендации по повышению уровня безопасности труда за счет повышения эффективности проветривания с учетом изменяющейся во времени и пространстве величины лобового аэродинамического сопротивления.

Основные защищаемые положения:

1. Полученная новая закономерность изменения величины депрессии, обусловленной наличием перемещающегося самоходного горного оборудования, позволяет уточнить понятие лобового аэродинамического сопротивления, к которому относятся только движущиеся объекты, и повысить качество проектирования вентиляционных систем, что способствует повышению уровня аэрологической безопасности;
2. Повышение устойчивости проветривания шахтной вентиляционной сети обеспечивается путем учета коэффициента лобового аэродинамического сопротивления, который должен определяться для каждого самоходного горного оборудования в зависимости от перекрытия сечения горной выработки, направления и скорости движения воздушного потока и машин.

3. Лобовые аэродинамические сопротивления движущихся машин могут создавать дополнительную депрессию, которую необходимо учитывать в вентиляционных расчётах, нормативной документации по проветриванию и при организации движения технологического транспорта.

Научная новизна:

1. Уточнена классификация видов лобовых аэродинамических сопротивлений для самоходного горного оборудования: предложено к лобовым аэродинамическим сопротивлениям относить только движущиеся объекты, что позволит при расчёте требуемого распределения воздуха по объектам проветривания шахты учесть изменение месторасположения машин в горных выработках во времени.
2. Установлено влияние направления движения горных машин относительно движения воздушного потока на величину дополнительной депрессии, обусловленной лобовым аэродинамическим сопротивлением.
3. Разработан и апробирован метод натурного и расчётного определения величины коэффициента лобового аэродинамического сопротивления горных машин, что позволяет прогнозировать параметры состояния производственной среды (воздухораспределение в шахтной вентиляционной сети).
4. Разработан и научно обоснован способ учета лобовых аэродинамических сопротивлений при проектировании вентиляции горных предприятий, что может быть использовано при создании нормативной документации в области безопасности труда.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Доказано влияние лобовых аэродинамических сопротивлений на устойчивость проветривания шахтных вентиляционных сетей.
2. Уточнена классификация аэродинамических сопротивлений, что позволяет систематизировать научные исследования в области исследований

рудничной аэродинамики и более четко подходить к учету этого вида сопротивлений при расчете параметров проветривания шахт.

3. Разработаны методические подходы к учету лобового аэродинамического сопротивления в горных выработках.
4. Разработаны алгоритм и методика расчёта лобовых аэродинамических сопротивлений в горных выработках.

Методы исследований включают в себя: анализ литературных источников; шахтные исследования аэродинамики горного самоходного оборудования; лабораторные исследования лобового аэродинамического сопротивления; компьютерное моделирование изменения величины лобового аэродинамического сопротивления и обусловленной им дополнительной депрессии.

Достоверность научных положений подтверждается значительным объемом шахтных экспериментальных исследований (на трех рудниках и одной угольной шахте); повторяющимися значениями измеряемых параметров; верификацией компьютерного моделирования процессов потери депрессии при обтекании движущихся в горных выработках объектов (более 150 численных экспериментов); положительным эффектом от внедрения полученных результатов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Безопасность и экология горного производства» Горного института НИТУ МИСИС, на научно-практических конференциях и симпозиумах, в том числе и международных (V Конференция международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого, Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр, Москва, 2022; XXXI Международный симпозиум «Неделя горняка 2023»; Научно-практическая конференция «Перспективы развития геологии, горного и нефтегазового дела» 23 сентября 2023 года, РУДН, Москва; Учения руководителей служб СДС ФГУП «ВГСЧ», Екатеринбург, 2024; XXXII Международный симпозиум «Неделя горняка 2024»; II Научно-

практическая конференция «Перспективы развития геологии, горного и нефтегазового дела» 24 сентября 2024 года, РУДН, Москва; XXXIII Международный симпозиум «Неделя горняка 2025», НИТУ МИСИС, Москва, 2025).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; обобщении и анализе данных; обосновании направлений и методов решения поставленных задач; проведении натурных измерений и численного компьютерного моделирования.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 статьи опубликованы в журналах, зарегистрированных в базе данных Scopus, издано 1 учебно-методическое пособие.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 23 таблицы и 50 рисунков. Библиография включает 82 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** диссертации рассмотрена динамика развития горной отрасли, а также проведен анализ состояния проветривания шахт и рудников Российской Федерации. По состоянию на 01.01.2025 года в России функционируют 75 угольных шахт¹, из них 56 шахт осуществляют добычу угля. За 2024 год подземным способом добыто 94,9 миллионов тонн угля. 62 обслуживаемые шахты являются газовыми, около 80%, в том числе 47 шахт (63%) с категорией по метану III и выше. На угольных шахтах около 512 участков, опасных по слоевым скоплениям метана. На 48 шахтах (64%) применяется нагнетательный способ проветривания, всасывающий на 13 шахтах (17%) и на 4 шахтах применяется комбинированный (нагнетательно-всасывающий)

¹ Угольные шахты, расположенные в Донецкой народной республике и Луганской народной республике не учтены в связи с отсутствием статистических данных.

способ проветривания. По схемам проветривания шахты распределились следующим образом:

- фланговая на 21 шахтах;
- центральная на 10 шахтах;
- комбинированная (центрально-фланговая) на 31 шахтах,

При определении устойчивости проветривания шахт на основании детального расчета служб депрессионных съемок ФГУП «ВГСЧ» в отчетах по проведению воздушно-депрессионных съемок сделаны выводы, что на 14 шахтах определена III категория по устойчивости проветривания, при которой имеют место изменения расхода воздуха в лавах и на выемочных участках более 50%, у всасов ВМП более 70% от расчетного, что может привести к опрокидыванию вентиляционной струи при работе шахты в нормальном технологическом режиме.

В горнорудной промышленности в настоящее время на 95 рудниках (69%) применяется нагнетательный способ проветривания, всасывающий на 34 рудниках (25%) и на 6 рудниках (4%) применяется комбинированный (нагнетательно-всасывающий) способ проветривания.

По схемам проветривания рудники распределились следующим образом:

- фланговая на 101 руднике;
- центральная на 28 рудниках;
- комбинированная (центрально-фланговая) на 6 рудниках.

По данным аварийности и травматизма на угольных шахтах видно (рисунок 1), что несмотря на общее снижение числа случаев, последствия от нарушения проветривания носят самый катастрофический характер. Наиболее крупные аварии, произошедшие на угольных шахтах в России за последние 20 лет представлены в таблице 1.

Аварии и инциденты, связанные с аэрологическими факторами, могут происходить из-за недостаточной проработанности проектов по проветриванию горных предприятий. Отсутствие в настоящее время нормативных документов

по проектированию вентиляции горных предприятий осложняет проблему. Ранее действовавшие документы по расчёту проветривания также не учитывали ряд факторов, например, лобовые аэродинамические сопротивления. Как показал анализ научных работ, данный вид аэродинамического сопротивления недостаточно изучен.

Таблица 1 – Наиболее крупные аварии, произошедшие на угольных шахтах России за последние 20 лет

Год	Наименование ОПО	Вид аварии	Количество погибших людей
2004	«Шахта Тайжина»	взрыв газа и пыли	47
2005	«Шахта Есаульская»	пожар в горных выработках, осложненный взрывом	25 (в том числе 17 горноспасателей)
2006	шахта «Центральная»	пожар в горных выработках	25
2007	«Шахта Ульяновская»	взрыв газа и пыли	110
2007	«Шахта Юбилейная»	взрыв газа и пыли	39
2010	шахта «Распадская»	взрыв газа и пыли	90 (в том числе 20 горноспасателей)
2011	шахта «Киселевская»	прорыв глины в очистном забое на глубине 120 метров	4
2013	«Шахта №7»	взрыв метановоздушной смеси	8
2013	шахта «Воркутинская»	взрыв метановоздушной смеси	18
2016	Шахта «Северная»	взрыв метановоздушной смеси	35 (в том числе 5 горноспасателей)
2021	Шахта «Листвяжная»	взрыв метановоздушной смеси	51 (в том числе 5 горноспасателей)

При проектировании вентиляции порядок единый для всех горных предприятий. На первом этапе определяют прогнозные значения по поступлению вредных веществ в рудничную атмосферу, затем рассчитывают необходимое и достаточное количество воздуха. На следующем этапе определяют величину аэродинамического сопротивления. Подбирают необходимые параметры и места установки вентиляционных сооружений. В заключительной части проектирования выбирают вентилятор, который позволит обеспечить расчётное количество воздуха.

При проектировании вентиляции угольных шахт учитывается аэродинамическое сопротивление трения, а местные аэродинамические сопротивления как правило принимаются равными 10 % от общего сопротивления трения. Лобовые аэродинамические сопротивления не учитываются.

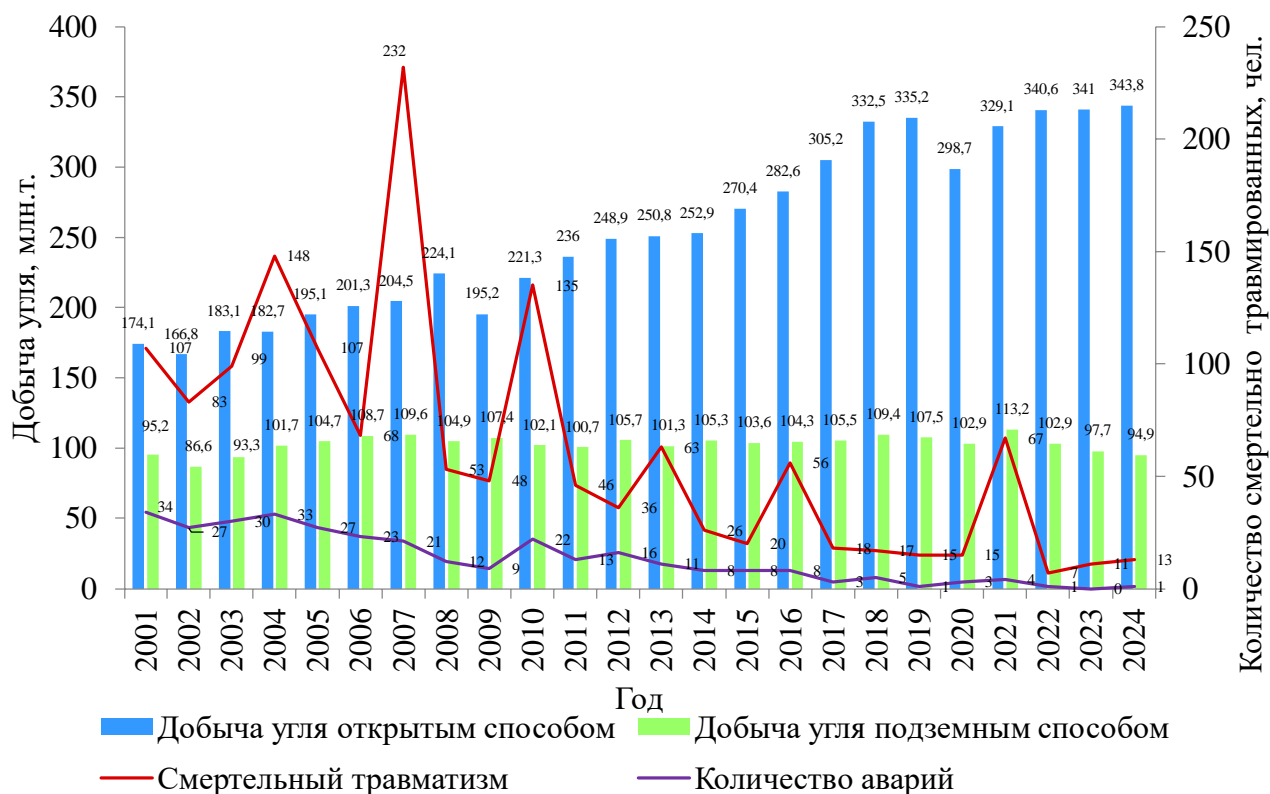


Рисунок 1 – Данные о количестве добытого угля и смертельно травмированных людей в организациях по добыче угля

Понятие лобового аэродинамического сопротивления для шахт и рудников введено в 1949 году академиком А.А. Скочинским и В.Б. Комаровым. С тех пор изучение лобовых аэродинамических сопротивлений проводилось только для клетей и скипов (А.И. Ксенофонтова, И.Е. Идельчик, Т.Д. Бевз, М.А. Семин), а также для расстрелов в стволах (А.И. Ксенофонтова, В.В. Кашибадзе, А.А. Харев, В.Д. Карпухин, П.И. Мустель). Встречаются отдельные формулы по определению лобового аэродинамического сопротивления электровозов с вагонами (Ф.С. Клебанов). Однако, в нормативной и проектной документации значения величин депрессии, обусловленной лобовым аэродинамическим

сопротивлением, не учитывались, и не приводятся коэффициенты лобового аэродинамического сопротивления.

К лобовым аэродинамическим сопротивлениям в рудничной аэрологии относят не только движущуюся горную технику (вагонетки, ПДМ, ШАС, буровые машины и т.п.), но также расстрелы и рудничные стойки. В аэродинамике других областей науки (машины, самолеты, ракеты и т.д.) указывается, что лобовое аэродинамическое сопротивление возникает только у движущихся объектов.

Для дальнейших исследований была разработана классификация аэродинамических сопротивлений (таблица 2), в которой устранены противоречия понятий, используемых в рудничной аэрологии, с понятиями из других областей наук (авиастроении, автомобилестроении и др.).

В основе предлагаемой классификации лежит сформированное и устоявшееся в России научное мнение о существовании трех видов аэродинамического сопротивления (аэродинамическое сопротивление трения, местные и лобовые аэродинамические сопротивления). Уточнение классификации выполнено в части того, что относить к каждому из трех видов сопротивлений.

Таблица 2 – Классификация аэродинамических сопротивлений

Классификация аэродинамического сопротивления горных выработок	
<p>Аэродинамическое сопротивление трения, $R_{тр.}$, кц</p>	<p>Шероховатость бортов, кровли и почвы горных выработок</p> <p>Равномерно распределенная крепь на участке длиной $l \geq 19$ м</p> <p>Конвейерная лента</p> <p>Трап, ж/д пути</p> <p>Стационарное горное оборудование, энергопоезд, трансформаторы, склад материалов при $l \geq 19$ м</p> <p>Рудничные стойки / растреллы на участке $l \geq 19$ м</p>
	<p>Поворот горной выработки</p> <p>Расширение / сужение горной выработки</p> <p>Соединение / разделение горных выработок</p> <p>Вентиляционная дверь (окно), парус</p> <p>Кроссинг</p> <p>Проходческий комбайн</p>
	<p>Рудничные стойки на участке $l < 19$ м</p> <p>Стационарное горное оборудование, трансформаторы, склад материалов при $l < 19$ м</p>
	<p>Протяженное СГО</p> <p>ширина ~ высота \ll длина (электровоз, моторельс и т.п.)</p> <p>СГО</p> <p>ширина ~ высота ~ длина (пдм, шас, буровая установка и т.п.)</p> <p>Клеть/сезин</p> <p>Комбайн очистной</p>
	<p>Группа людей</p> <p>Один человек</p>
<p>Аэродинамическое местное сопротивление, $R_{м.}$, кц</p>	<p>Движущееся горное оборудование</p> <p>Человек</p>
<p>Аэродинамическое лобовое сопротивление, $R_{л.}$, кц</p>	<p>Протяженное СГО</p> <p>ширина ~ высота \ll длина (электровоз, моторельс и т.п.)</p> <p>СГО</p> <p>ширина ~ высота ~ длина (пдм, шас, буровая установка и т.п.)</p> <p>Клеть/сезин</p> <p>Комбайн очистной</p> <p>Группа людей</p> <p>Один человек</p>

Жирным шрифтом отмечены предлагаемые изменения

Вторая глава диссертационного исследования включает описание и результаты лабораторного и натурных экспериментов, проведенных на трех рудниках и одной угольной шахте.

Для изучения лобовых аэродинамических сопротивлений была проведена серия лабораторных экспериментов на кафедральной установке (рисунок 2), которые подтвердили существенное влияние лобового аэродинамического сопротивления на величину общего аэродинамического сопротивления участка.

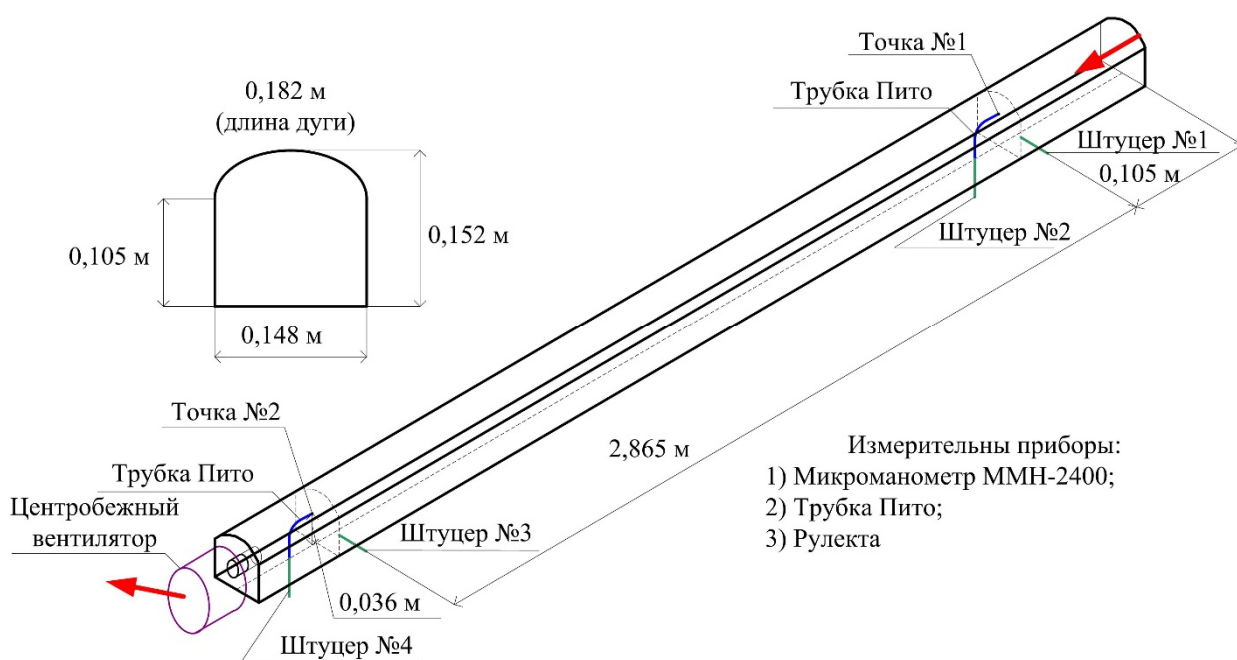


Рисунок 2 – Параметры лабораторной установки и перечень измерительных приборов

По результатам лабораторных исследований установлено, что при перекрытии площади сечения горной выработки объектом (в лабораторной установке использовались параллелепипеды) происходит дополнительная потеря депрессии, затрачиваемая на преодоление аэродинамического лобового сопротивления. Скорость движения воздуха в модели уменьшается также нелинейно (рисунок 3б). Характер зависимости величины аэродинамического сопротивления, обусловленного лобовым аэродинамическим сопротивлением и соответствующий коэффициент от процента перекрытия площади сечения,

аналогичен зависимости, представленной на рисунке 3а. Исследования влияния движения объекта в модели показали, что теряемая депрессия не является постоянной величиной. Для получения описания установленной зависимости использовалось моделирование в Ansys CFX. Полученные данные лабораторного эксперимента были использованы для верификации.

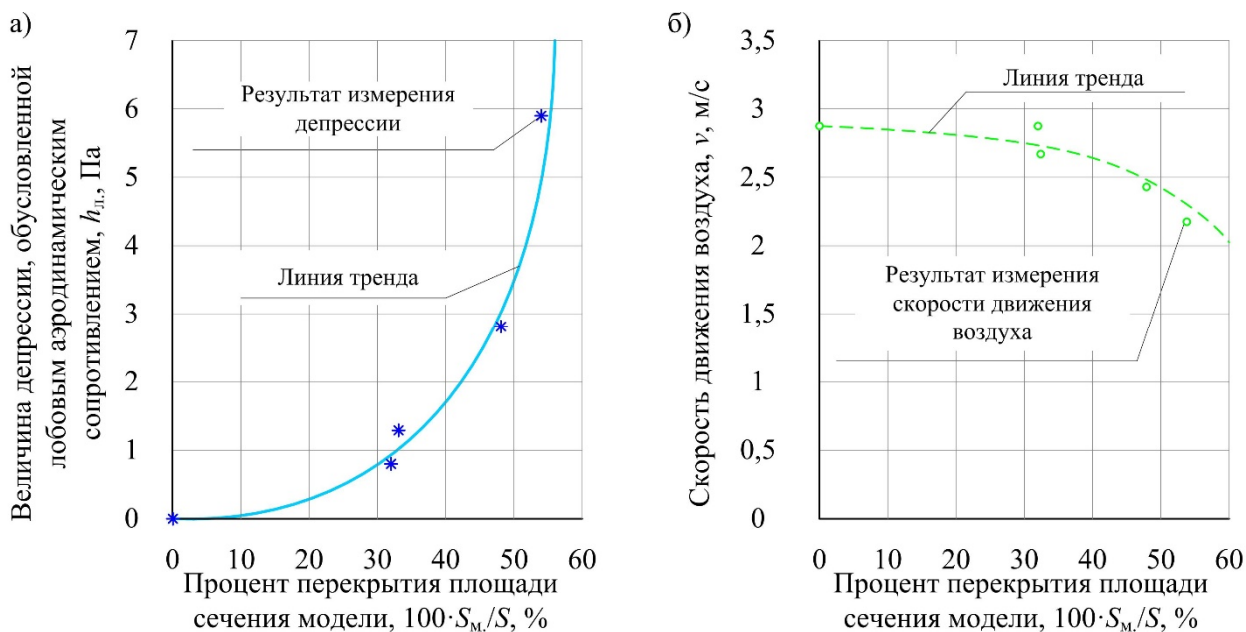


Рисунок 3 – Результаты лабораторного эксперимента

Для изучения лобовых аэродинамических сопротивлений и их влияния на шахтную вентиляционную сеть была разработана и апробирована в филиалах ФГУП «ВГСЧ» методика определения лобового аэродинамического сопротивления (приведена в диссертации). Результаты измерений подтвердили наличие изменяющегося аэродинамического сопротивления, обусловленного движущимся самоходным горным оборудованием. Во всех экспериментах наблюдались аналогичные физические процессы (рисунок 4).

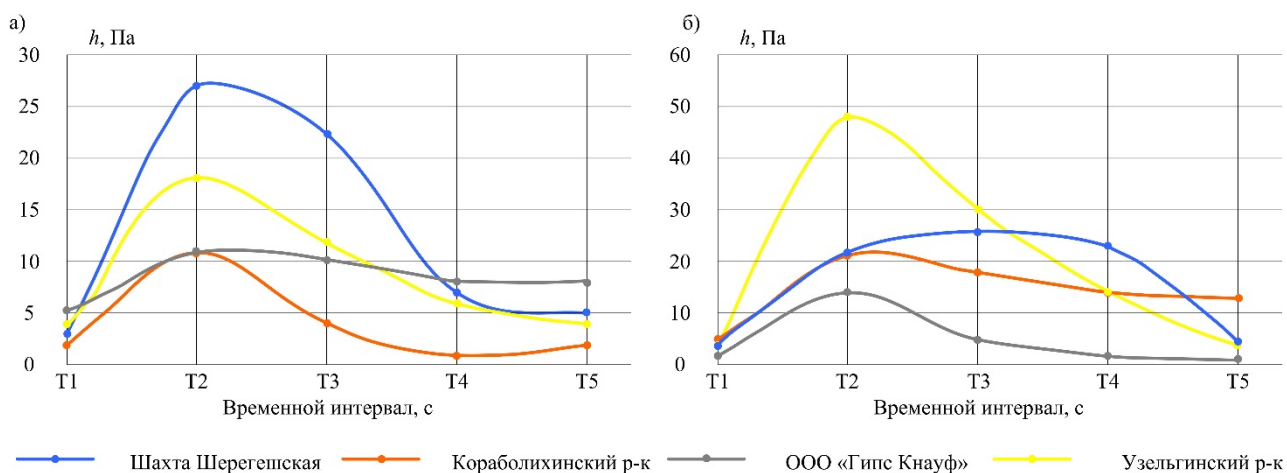


Рисунок 4 – Сводный график изменения депрессии при движении

СГО в а) попутном с воздушной струей направлении и б) в

противоположном с воздушной струей направлении (временной интервал

30-60 с, во время T1 СГО заезжает на экспериментальный участок)

По результатам натурных экспериментов можно сделать вывод, что при движении в горной выработке СГО происходит существенный рост депрессии на исследуемом участке. Так при движении машины в попутном с воздушной струей направлении (рисунок 4а) было зафиксировано увеличение депрессии от 2 до 9 раз, а при движении машины в противоположном с воздушной струей направлении (рисунок 4б) депрессия увеличилась от 4 до 12 раз, что наглядно показывает влияние лобового аэродинамического сопротивления на исследуемом участке. Также выявлено влияние направления воздушной струи.

Натурным экспериментом на шахте «Шерегешская» установлено наличие «поршневого» эффекта, создаваемого СГО при движении его в попутном с воздушной струей направлении (депрессия увеличилась в 9 раз).

Экспериментально подтверждена зависимость прироста сопротивления от исходной скорости воздушного потока: чем выше скорость воздуха в горной выработке, тем большее влияние оказывает наличие СГО на величину лобового аэродинамического сопротивления на исследуемом участке.

Исследования проводились по разработанной методике на экспериментальных участках длиной 100 м. Соответственно эквивалентная длина горной выработки в зависимости от условий может быть в диапазоне

от 200 до 1200 м, что существенно отразится на воздухораспределение в шахтной вентиляционной сети.

Также установлено, что чем больше в процентном отношении перекрытие сечения горной выработки машинами СГО, тем больше влияние лобового аэродинамического сопротивления на общее аэродинамическое сопротивление экспериментального участка (рисунок 5).

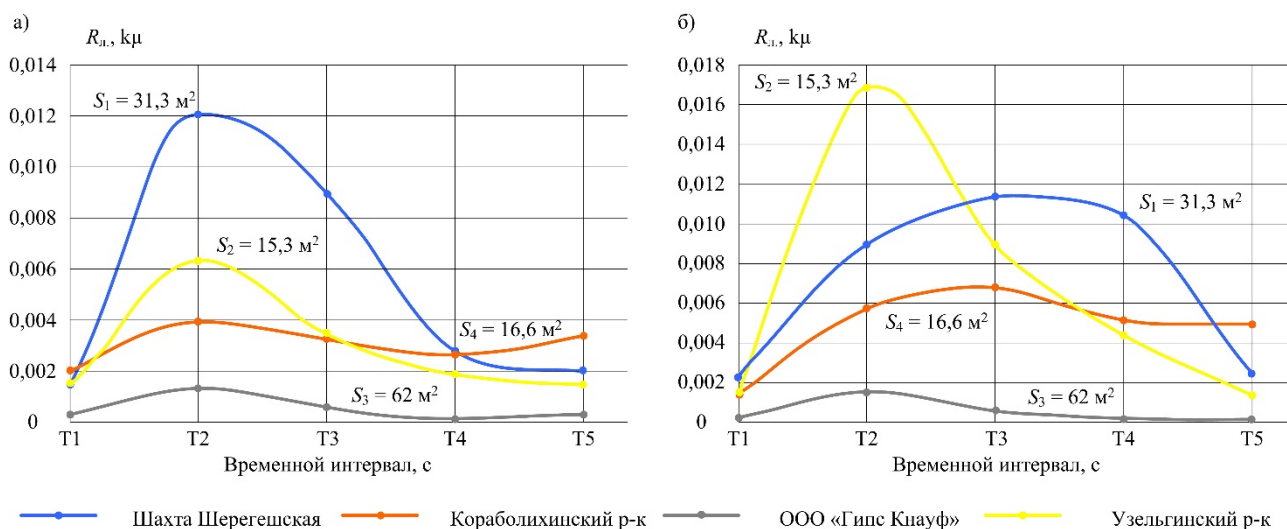


Рисунок 5 – Сводный график изменения аэродинамического сопротивления, обусловленного лобовым сопротивлением: а) движением СГО в попутном с воздушной струей направлении и б) движением СГО в противоположном с воздушной струей направлении

Разработанная и апробированная методика проведения натурных измерений величины депрессии и сопротивления, обусловленных лобовым аэродинамическим сопротивлением, может быть использована на действующих горных предприятиях. Для проектируемых шахт и рудников **в третьей главе** диссертации разработана методика проведения численного трехмерного моделирования, реализованная в программном комплексе Ansys CFX.

Общая схема к определению расчётных участков с графическими результатами расчётов приведена на рисунке 6. Параллельная ветвь позволяет при моделировании учесть влияние лобового аэродинамического сопротивления на изменение скорости движения воздушного потока в горной выработке с СГО. Порядок определения величины депрессии, аэродинамического сопротивления

и соответствующего коэффициента, обусловленных лобовым аэродинамическим сопротивлением, приведен в таблице 3.

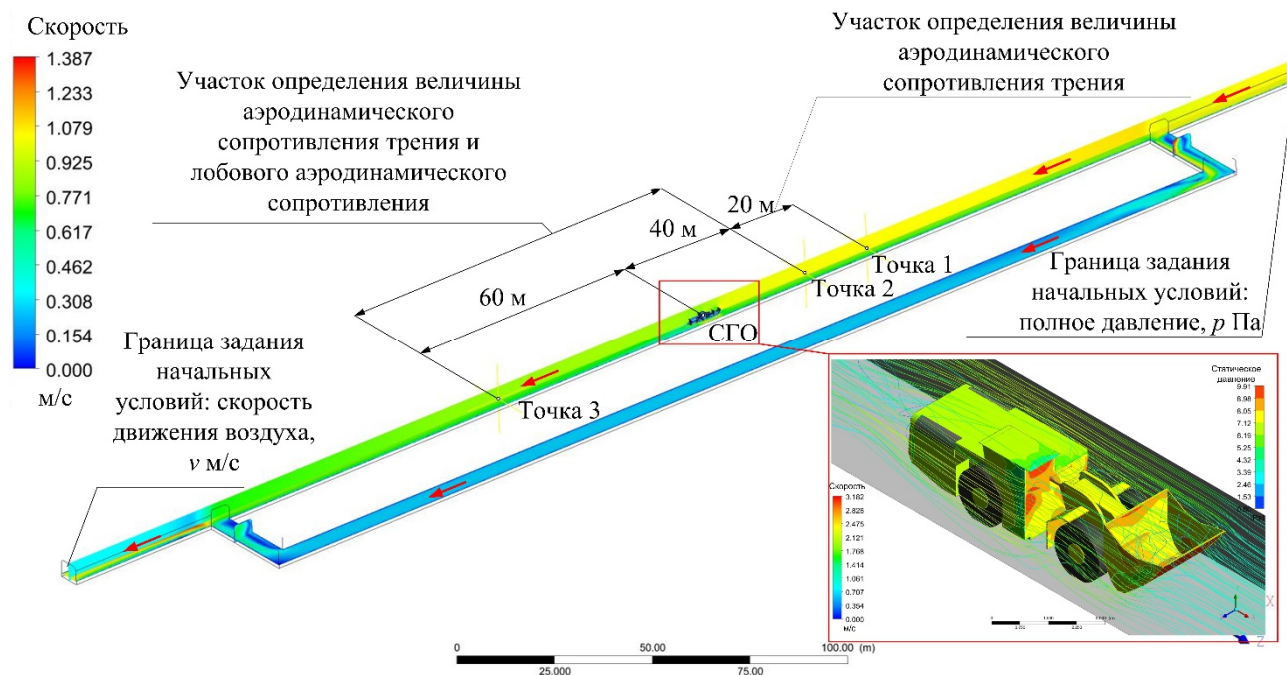


Рисунок 6 – Схема к определению расчётных участков и результаты моделирования

Таблица 3 – Порядок определения $h_{л.}$, $R_{л.}$, c при проведении численного моделирования

№	Рассчитываемый параметр	Формула
1.	Рассчитывается удельное аэродинамическое сопротивление трения на участке с установившимся потоком воздуха скоростью движения воздуха по оси горной выработки	$h_{тр.20м} = p_1 - p_2$
2.	Рассчитывается общее падение депрессии на участке 100 м с СГО	$h_{об.} = p_1 - p_3$
3.	Рассчитывается депрессия аэродинамического сопротивления трения для участка с СГО	$h_{тр.100м} = 5 \cdot h_{тр.20м}$
4.	Рассчитывается падение депрессии, обусловленное влиянием лобового сопротивления трения	$h_{л.} = h_{об.} - h_{тр.100м}$
5.	Рассчитывается величина лобового аэродинамического сопротивления	$R_{л.} = h_{л.} / Q^2$
6.	Рассчитывается коэффициент лобового аэродинамического сопротивления	$c = (2h_{л.}(S - S_M)) / (\rho v^2 S_M)$

Численным экспериментом установлено, что значение аэродинамического лобового сопротивления и соответствующий коэффициент для отдельной СГО - величины непостоянные (рисунок 7). Он зависит от скорости движения воздуха

и машины, а также от площади сечения горной выработки и миделевого сечения СГО. Следует отметить, что при скоростях обтекания СГО воздушным потоком от 0,5 до 15 м/с величина коэффициента изменяется незначительно и может быть принята за постоянную величину.

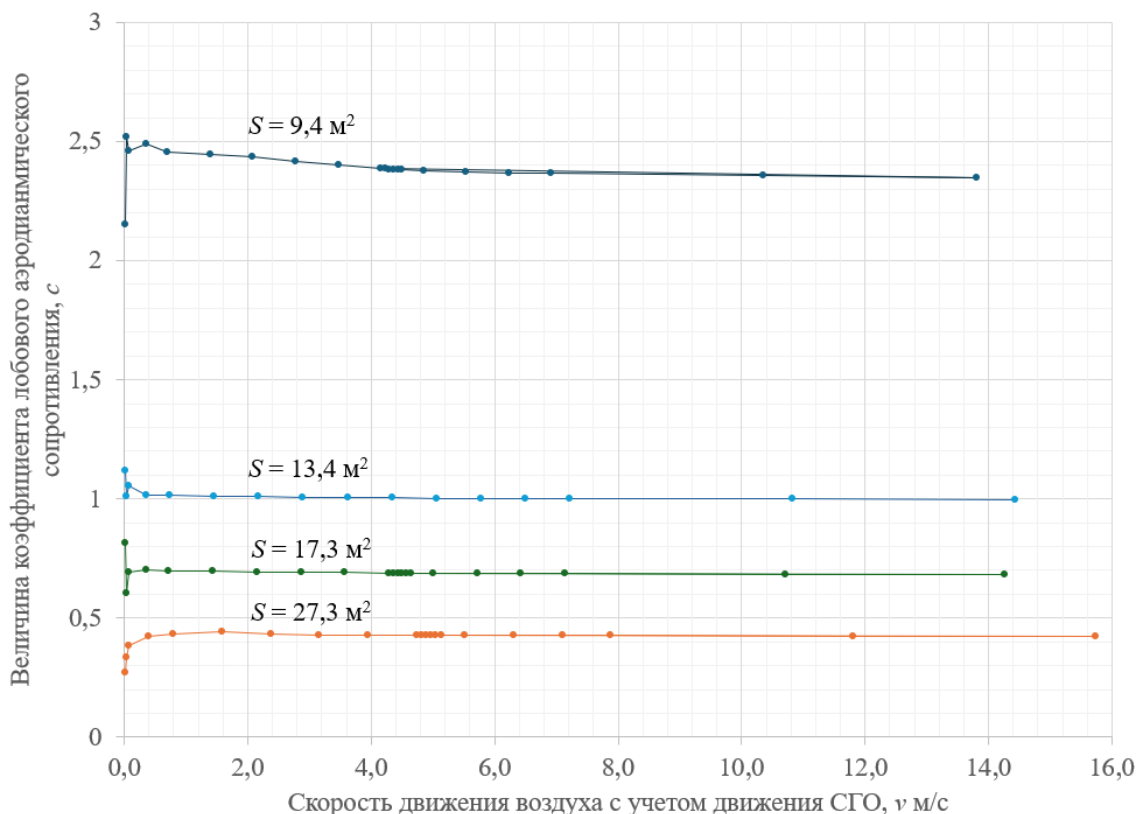


Рисунок 7 – Графики зависимости коэффициента лобового аэродинамического сопротивления трения от скорости движения воздуха и СГО

Установлено, что при скоростях обтекания СГО марки Atlas Copco ST-1030 воздушным потоком от 0,5 до 15 м/с коэффициент лобового аэродинамического сопротивления равен $c = 2,4$ при $S = 10,3 \text{ м}^2$, $c = 0,7$ при $S = 18,2 \text{ м}^2$, $c = 0,4$ при $S = 28,1 \text{ м}^2$. График зависимости коэффициента лобового аэродинамического сопротивления трения от процента перекрытия площади сечения горной выработки (рисунок 8) имеет зависимость аналогичную лабораторным исследованиям.

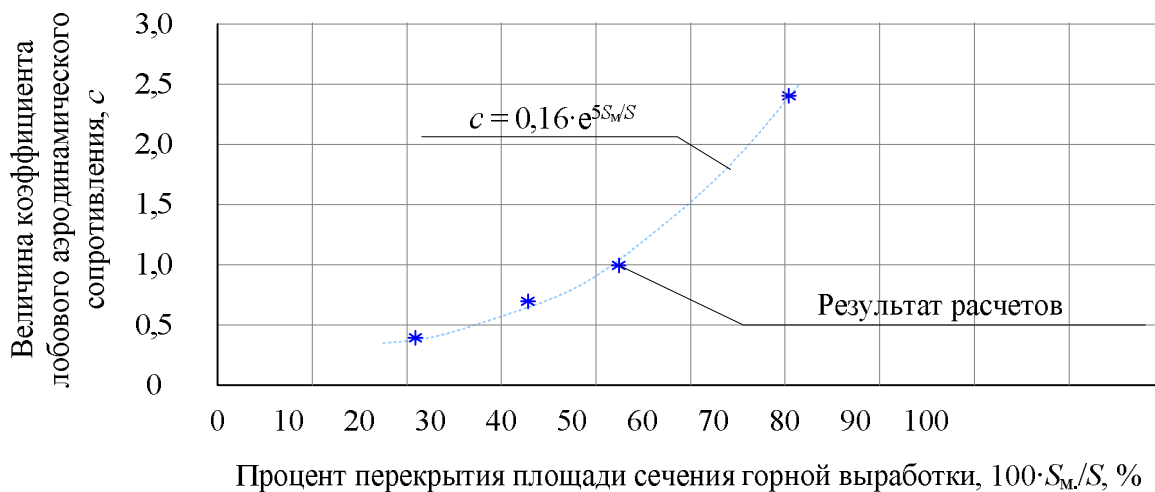


Рисунок 8 – График зависимости коэффициента лобового аэродинамического сопротивления трения от процента перекрытия площади сечения горной выработки

Для учета лобового аэродинамического сопротивления трения при проектировании вентиляции **в четвертой главе** диссертационного исследования предложены рекомендации и приведен пример по результатам апробации, проведенной на руднике «Скалистый» (рисунок 9). Принципиальное отличие лобового аэродинамического сопротивления, обусловленного СГО от других видов аэродинамических сопротивлений, заключается в том, что оно постоянно меняет свое местоположение в горных выработках, а его величина изменяется что делает его учет затруднительным при проектировании вентиляции.

Для оценки влияния лобового аэродинамического сопротивления на общее аэродинамическое сопротивление шахтной вентиляционной сети и на перераспределение в ней воздуха разработан алгоритм (рисунке 10). Он может быть реализован в программных комплексах Вентиляция 2, Аэросеть, РЕВОД, Динавент или др.

Для апробации метода определения величины лобовых сопротивлений и рекомендаций по порядку учета лобовых сопротивлений были проведены расчёты для действующего горного предприятия (рисунок 9).

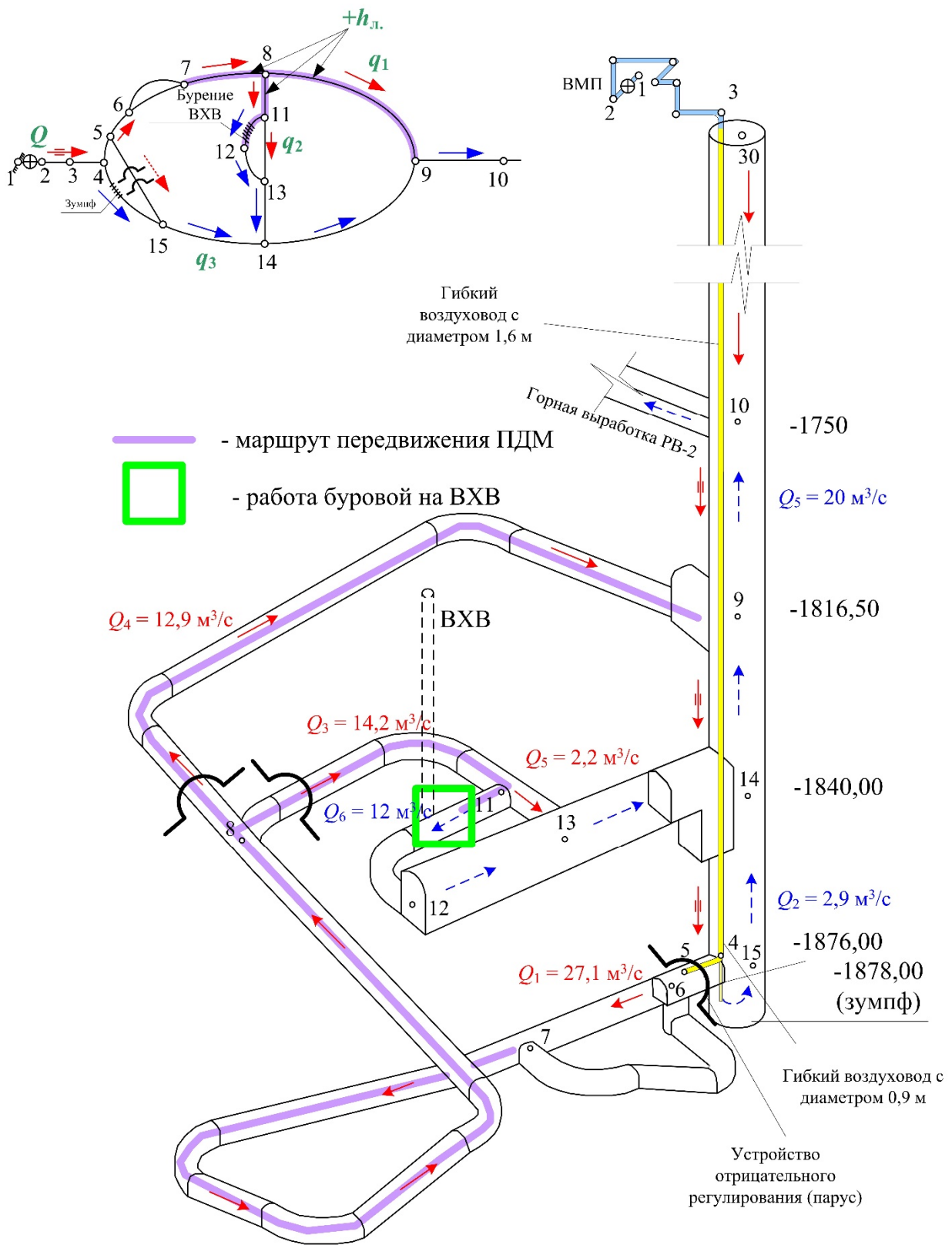


Рисунок 9 – Аксонометрическая схема проветривания горных выработок околоствольного двора при бурении вентиляционного ходового восстающего (ВХВ)

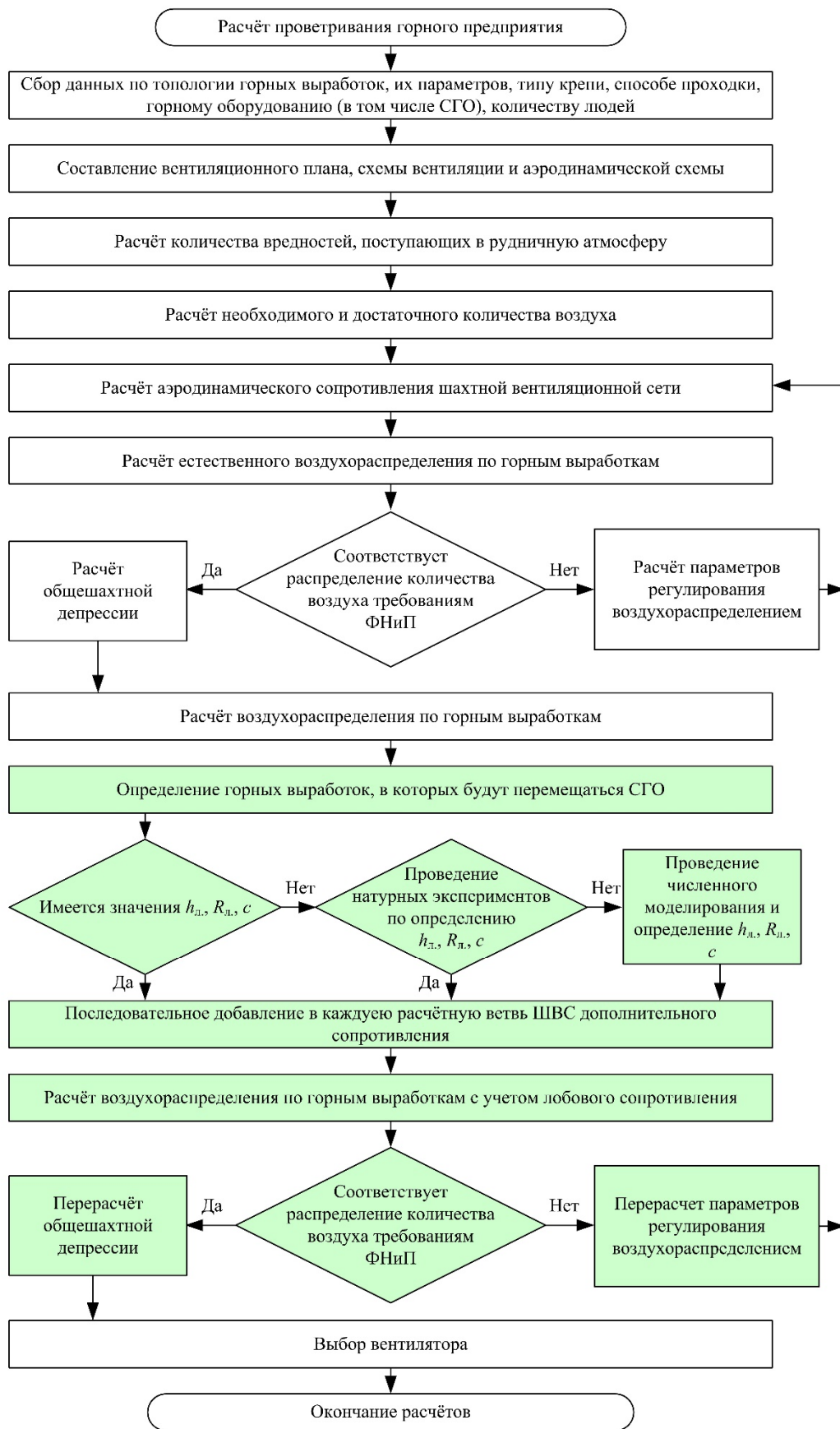


Рисунок 10 – Алгоритм учета лобовых аэродинамических сопротивлений при расчете проветривания шахты

Дополнительная депрессия, затрачиваемая на преодоление аэродинамического лобового сопротивления, прибавляется к ветвям 4-5-6-7-8 или 8-11-13-14, или 8-9 (в зависимости от места нахождения машины). Согласно результатам моделирования дополнительная депрессия зависит от скорости движения воздуха и погрузо-доставочной машины (ПДМ), $h_{л.}$ находится в диапазоне от 0,1 Па (при скорости движения 1 м/с) до 67 Па (при скорости 22 м/с) (таблица 4). Дополнительное аэродинамическое сопротивление в ветви будет равно 0,001 кр. Данная величина поэтапно добавляется к соответствующим ветвям, в которых будет находиться ПДМ. По расчётам для ветви 8-11-13-14 произойдет существенное падение расхода воздуха на 2,3 м³/с (16 %), значительно вырастет депрессия рассматриваемого участка вентиляционной сети с 19 Па до 86 Па (на 256 %). При других вариантах также произойдет изменение расхода воздуха относительно варианта без учета лобового аэродинамического сопротивления. Однако данные варианты в рассматриваемом случае не приведут к загазированию.

Для избегания аварийной ситуации, связанной с загазированием, рекомендуется увеличить расход подаваемого воздуха на 6 м³/с, то есть до 36 м³/с. При таком значении при любом расположении ПДМ расход воздуха в месте бурения вентиляционно-ходового восстающего (ВХВ) будет соответствовать расчётному значению. Увеличение расхода воздуха на 20 % возможно при использовании существующего вентилятора.

Данная рекомендация была учтена при проектировании вентиляции. Исследования лобового аэродинамического сопротивления в условиях действующего рудника «Скалистый» шахты «Глубокая» подтвердил существенное влияние на распределение воздуха в вентиляционной сети.

Таблица 4 – Сводные параметры для трех возможных вариантов размещения ПДМ в вентиляционной сети

Ветвь	Расход воздуха, м ³ /с	Аэродинамическое сопротивление трения, кр	Дополнительное сопротивление, кр	ΔR , %	Депрессия, Па	Дополнительная депрессия, обусловленная лобовым сопротивлением, Па	Расход воздуха, м ³ /с
1 вариант: ПДМ в горной выработке 8-9							
8-9	12,9	0,001319	+0,00107	+81%	2,16	+67	11,0
8-11-13-14	14,2	0,000799	-	-	1,58	-	16,1
4-15-14	2,9	0,190303	-	-	15,08	-	2,9
2 вариант: ПДМ в горной выработке 8-11-13-14							
8-9	12,9	0,001319	-	-	2,16	-	15,1
8-11-13-14	14,2	0,000799	+0,00107	+134%	1,58	+67	11,9
4-15-14	2,9	0,190303	-	-	15,08	-	3
3 вариант: ПДМ в горной выработке 4-15-14							
8-9	12,9	0,001319	-	-	2,16	-	13
8-11-13-14	14,2	0,000799	-	-	1,58	-	14,1
4-15-14	2,9	0,190303	+0,00107	+1%	15,08	+67	2,9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, дано новое решение актуальной для горнодобывающей промышленности научной задачи по учету лобового аэродинамического сопротивления при расчетах проветривания горного предприятия, что позволяет повысить уровень безопасности и эффективности горных работ.

На основе анализа схем проветривания шахт и рудников, изучения нормативных документов, результатов лабораторных и натурных экспериментов, а также численного моделирования влияния лобового аэродинамического сопротивления на воздухораспределение в шахтной вентиляционной сети сформулированы основные научные и практические результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором, которые заключаются в следующем:

1. Аварии и инциденты могут происходить из-за недостаточной проработанности проектов по проветриванию горных предприятий, а также нарушений требований нормативных документов. Аварийные загазования на угольных шахтах происходят регулярно: по официальной статистике с частотой один раз в два дня. В настоящее время отсутствуют нормативные документы по проектированию вентиляции горных предприятий. Ранее действовавшие документы по расчёту проветривания также не учитывали лобовые аэродинамические сопротивления.
2. Разработана классификация аэродинамических сопротивлений, которая соответствует современным представлениям и согласуется с общефизическими представлениями в смежных областях знаний. В основе предлагаемой классификации лежит сформированное и устоявшееся в России научное мнение о существовании трех видов аэродинамических сопротивлений (трение, местные и лобовые аэродинамические сопротивления). Предложено к лобовым аэродинамическим сопротивлениям в рудничной аэрологии относить только движущиеся объекты; неподвижные следует относить и учитывать в расчетах депрессии как местные сопротивления.
3. В предложенной классификации аэродинамических сопротивлений к лобовому аэродинамическому сопротивлению в шахтах и рудниках следует относить все движущиеся объекты: СГО, клеть/скип и людей. При этом с учетом влияния конструкции горного оборудования на аэродинамическое сопротивление трения воздуха о поверхность СГО можно разделить на два подвида: 1) СГО, у которого длина, высота и ширина сопоставимы между собой (ПДМ, ШАС, буровые установки); 2) СГО имеющего большую протяженность (электровозы с составами, монорельсовый транспорт и др.).
4. Установлено, что лобовое аэродинамическое сопротивление может привести к перераспределению воздушных потоков в шахтной

вентиляционной сети, при этом расход воздуха в отдельных ветвях может упасть ниже расчётных значений, что снижает безопасность ведения горных работ, эффективность и устойчивость проветривания.

5. Доказано, что лобовые аэродинамические сопротивления движущихся машин создают дополнительную депрессию (рост депрессии от 2 до 12 раз, а также наблюдался «поршневой» эффект).
6. Установлено, что коэффициент лобового аэродинамического сопротивления изменяется для каждого СГО в широком диапазоне в зависимости от перекрытия сечения горной выработки и направления воздушного потока относительно движения машин.
7. Разработана и верифицирована методика численного моделирования с целью определения величин лобового аэродинамического сопротивления. Результаты применения данной методики могут быть использованы для проектирования проветривания горных предприятий.
8. Разработана и апробирована методика натурного определения лобового аэродинамического сопротивления, обусловленного движущимся СГО. Результаты применения данной методики могут быть использованы для анализа состояния шахтной вентиляционной сети, повышения достоверности расчетов проветривания, что позволит повысить общий уровень безопасности и эффективность ведения горных работ.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих опубликованных работах:

- в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ:
- 1. Федоров Д.А., Кобылкин С.С. Порядок определения и учета лобовых аэродинамических сопротивлений при проектировании вентиляции шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – СВ № 13. – С. 3-18.
- 2. Федоров Д.А. Влияние лобовых аэродинамических сопротивлений на безопасность горных предприятий // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 68–75. EDN YVGFEA

3. Кобылкин С. С., Федоров Д.А., Кузнецов И.И. Обновленная классификация аэродинамических сопротивлений горных предприятий // Горная промышленность. – 2025. – №4. – С. 92-96.
- прочих изданиях:
4. Кобылкин С.С., Кузнецов И.И., Федоров Д.А., Кобылкин А.С. Оценка влияния местных и лобовых аэродинамических сопротивлений на воздухораспределение в вентиляционной сети //В сборнике: Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. 5 Конференция международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого. М., 2022. С. 266-268.
5. Федоров Д.А. О важности учета местных аэродинамических сопротивлений при проветривании шахт //В сборнике: Перспективы развития геологии, горного и нефтегазового дела: материалы научно-практической конференции. Москва, РУДН, 29 сентября 2023 г. / под редакцией А. Е. Котельникова. – М.: РУДН, 2023. – С. 73-76.
6. Федоров Д.А. Компьютерное трехмерное моделирование стохастических процессов для определения величины лобового аэродинамического сопротивления на примере клетового ствола //В сборнике: Перспективы развития геологии, горного и нефтегазового дела: материалы научно-практической конференции. Москва, РУДН, 29 сентября 2024 г. / под редакцией А. Е. Котельникова. – М.: РУДН, 2024. – С. 33-35
7. Кулик А.И., Федоров Д.А., Лукашов О.Ю., Кобылкин С. С. Проектирование вентиляции горных предприятий. Программа Вентиляция 2: Учебно-методическое пособие / А. И. Кулик, Д. А. Федоров, О.Ю. Лукашов, С.С. Кобылкин — Москва: Издательство «Горная книга», 2025. — 78 с.